



Universidade Estadual de Campinas

Faculdade de Engenharia Química

Departamento de Engenharia de Sistemas Químicos

Área de Concentração: Sistemas de Processos Químicos e Informática

**Uma Nova Estratégia para a
Reestruturação de Redes de
Trocadores de Calor**

Autor: Rogério Geaquinto Herkenhoff

Orientador: Prof. Dr. Roger Josef Zemp

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Química como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Química.

Campinas – SP

Agosto de 2008

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

H425u Herkenhoff, Rogério Geaquinto
Uma nova estratégia para a reestruturação de redes de
trocadores de calor / Rogério Geaquinto Herkenhoff.--
Campinas, SP: [s.n.], 2008.

Orientador: Roger Josef Zemp.
Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Permutadores térmicos. 2. Energia. 3. Processos
químicos. I. Zemp, Roger Josef. II. Universidade
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia
Química. III. Título.

Título em Inglês: A new strategy for retrofit of heat exchanger networks

Palavras-chave em Inglês: Heat exchanger network, Process integration,
Retrofit

Área de concentração: Sistemas de processos químicos e informática

Titulação: Doutor em Engenharia Química

Banca examinadora: André Luiz Hemerly Costa, Fábio dos Santos

Liporace, Marcelo Modesto da Silva, Antônio Carlos
Luz Lisboa

Data da defesa: 11/08/2008

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Química

Tese de Doutorado defendida por Rogério Geaquinto Herkenhoff e
aprovada em 11 de agosto de 2008 pela banca examinadora constituída
pelos professores doutores:



Prof. Dr. Roger Josef Zemp – Orientador



Prof. Dr. André Luiz Hemerly Costa



Dr. Fábio dos Santos Liporace



Prof. Dr. Marcelo Modesto da Silva



Prof. Dr. Antônio Carlos Luz Lisboa

Este exemplar corresponde à versão final da Tese de Doutorado em Engenharia Química defendida por Rogério Geaquinto Herkenhoff e aprovada pela comissão julgadora em 11 de agosto de 2008.

Prof. Dr. Roger Josef Zemp

Dedicatória

Este trabalho é dedicado à minha família e à Petrobras, que dentre suas outras incontáveis qualidades, incentiva jovens de 25 a 55 anos a começar e concluir seus cursos de pós-graduação.

Agradecimentos

Agradeço a muita gente por sua imprescindível e inestimável ajuda neste trabalho, não necessariamente na ordem de importância.

A meu orientador, por seu comportamento durante todo o projeto e pela coragem de abraçar, patrocinar e colaborar ativamente num projeto cuja linha de pesquisa poderia, aos olhos de muita gente, parecer antiquada.

Ao meu chefe, Humberto Matrangolo de Oliveira, por seu incentivo durante toda a duração do curso, inclusive considerando-o como uma de minhas atividades ordinárias e até mesmo prioritárias.

Aos colegas da Universidade Petrobras, o melhor lugar do mundo para trabalhar, por suas valiosas ajudas e sugestões. Dentre eles, é preciso citar alguns, que participaram mais ativamente em várias etapas. Filipe Leandro de Figueiredo Barbosa e Paulo Roberto Costa Camargo, depois auxiliados por Danilo Prates de Oliveira, foram meus consultores de informática (Word e Excel) e de normas e estilo para a elaboração do texto. Nilo Indio do Brasil e Paulo Camargo (novamente) foram os principais revisores do texto. Débora Forte da Silva Lage também participou da revisão, além de contribuir com diversas e ricas sugestões de natureza geral (muitas delas aproveitadas, pelo menos parcialmente, mas nem todas, por falta de tempo ou espaço).

No Centro de Pesquisas da Petrobras (CENPES), dois especialistas da Engenharia Básica deram importantes sugestões e forneceram material para a montagem de alguns dos exemplos utilizados em nossas demonstrações: Cláudio Leandro Merico Kuboski e Antônio Vicente Silva de Castro. Cláudio Kuboski contribuiu ainda na revisão dos artigos técnicos correspondentes, e na elaboração de um questionário que seria enviado a especialistas de diversas empresas e universidades para colher sua opinião sobre aspectos controversos, mas acabou não sendo utilizado.

Na Linnhoff March (KBC), agradeço a Allan Rudman, por sua presta e prestimosa ajuda, executando alguns de nossos casos no programa SuperTarget, para eliminar dúvidas quando os resultados dos programas utilizados nesta tese eram divergentes.

Finalmente, na Universidade de Manchester, é preciso agradecer a Steven Doyle por sua ajuda com o programa SPRINT (e os demais programas, utilizados na fase inicial) e ao diretor do grupo de Integração de Processos, Prof. Dr. Robin Smith, por suas sugestões em diversos aspectos. A ambos, agradeço ainda a autorização para que o SPRINT pudesse ser utilizado em nossas comparações, com sua conseqüente publicação.

Resumo

Nesta tese é proposta uma nova estratégia para o projeto de reestruturação de redes de trocadores de calor, qualquer que seja seu objetivo: ampliação de carga ou modificações das condições operacionais, otimização da recuperação de energia, melhor atendimento das demandas do processo industrial, etc.

Esta proposta é baseada num método consagrado, conhecido como “Pinch Design Method” e originalmente restrito ao projeto de redes novas (“grass-root design”), e inclui toda a formulação e demais requisitos necessários para sua extensão à reestruturação de redes existentes. Tanto o método original quanto a adaptação agora proposta têm origem termodinâmica e montagem “manual” da rede, em oposição à (síntese) automatizada.

A base conceitual da chamada “Pinch Technology” é extensivamente apresentada e discutida na tese, que ainda inclui vários estudos de caso para demonstrar sua atualidade, através da confrontação com os resultados típicos da síntese automatizada de redes novas.

O método proposto é basicamente dedicado ao pré-estabelecimento dos objetivos de projeto, com a posterior utilização das regras de síntese e demais ferramentas do método original. Em comparação com o procedimento tradicional sugerido no contexto da “Pinch Technology”, o método proposto propõe objetivos mais ambiciosos, e ainda assim, realistas (na remontagem da rede, os objetivos previamente estabelecidos podem ser alcançados). O processo de remontagem da rede, embora mais difícil que a síntese de redes novas, também é facilitado em relação ao método tradicional que, além disto, tem aplicação mais restrita.

A reestruturação automatizada de redes não é contemplada neste estudo, mesmo porque ela ainda não dispõe de produtos largamente aprovados, para uso geral.

Na parte final da tese, três exemplos complexos demonstram as mais relevantes vantagens do método proposto sobre o método tradicional manual (nos casos em que ele se aplica), e sua maior (ou irrestrita) aplicabilidade.

Palavras-chave: rede de trocadores de calor, síntese de redes, baterias de trocadores, integração de processos, otimização energética, recuperação de energia, sistema de recuperação de energia, rede existente.

Abstract

In this thesis, it is proposed a new design strategy for restructuring existing heat exchanger networks, regardless of its objective: heat recovery optimization, better or full achievement of the industrial process demands, reutilization under different operational conditions, plant capacity expansion, etc.

The proposed strategy is based on the widely approved Pinch Design Method, originally restricted to the design of new networks (grass-root design), and includes all formulation and additional requirements for its extension to existing networks (retrofits, revamps, etc.). Both the original and the proposed method are thermodynamically based, with manual construction of the network structure, in opposition to the automated synthesis.

The conceptual basis of the Pinch Technology is extensively presented and discussed in the thesis, which also includes several case studies to demonstrate its realism, when confronted to the typical results of the automated synthesis of new networks.

The proposed method is basically devoted to the pre-establishment of design objectives (targeting), and takes later advantage of the synthesis rules and accessory tools of the original methodology. In comparison with the most traditional non-automated Pinch method, the new strategy suggests more ambitious design targets, but quite still realistic (for all case studies, it was found a modified structure to meet the targets). Because of the similarity with a new design, finding a modified structure to achieve the targets is also easier than in the traditional method, whose application is also more restricted.

Automated restructuring of existing networks is not included in our case studies, as no corresponding reliable product is commercially available for general use.

Finally, three complex examples demonstrate the most relevant advantages and realism of the proposed method, compared to the traditional one (when applicable), as well as its wider (or unrestricted) applicability.

Keywords: heat exchanger network, HEN, network synthesis, heat exchanger train, process integration, heat recovery, heat recovery system, existing network, existing train, retrofit, revamp.

Sumário

Capítulo 1	Motivação, objetivos e metodologia	1
Capítulo 2	Introdução e revisão histórica	3
	2.1 - Métodos heurísticos	3
	2.2 - Métodos termodinâmicos	4
	2.3 - Métodos automatizados.....	6
Capítulo 3	A “Pinch Technology” tradicional	9
	3.1 - Curvas compostas.....	9
	3.2 - Consumo de energia x ΔT_{min}	12
	3.3 - Área estimada x ΔT_{min}	14
	3.4 - O ΔT_{min} ótimo.....	18
	3.5 - Outros aspectos da análise termodinâmica	22
	3.6 - A síntese de redes novas	32
	3.7 - A otimização de redes existentes	33
	3.8 - Reestruturação de redes existentes.....	38
Capítulo 4	Redes novas: Síntese manual x Síntese automatizada	39
	4.1 - Bases de comparação	41
	4.2 - Estudo numérico - Caso 4.1	42
	4.3 - Estudo numérico - Caso 4.2	45
	4.4 - Estudo numérico - Caso 4.3	50
	4.5 - Resumo e análise dos resultados	53
Capítulo 5	Redes existentes: o método proposto e suas vantagens	55
	5.1 - O método proposto.....	56
	5.2 - Estudo comparativo - Caso 5.1	60
	5.3 - Estudo comparativo - Caso 5.2	69
	5.4 - Estudo numérico - Caso 5.3	71
	5.5 - Comparação e características adicionais.....	76
	5.6 - Aplicação a casos complexos (cuidados adicionais).....	79
Capítulo 6	Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	81
	Referências bibliográficas	83

Lista de Figuras

Figura 3.1 – 3 correntes frias de CP constante (em kW/°C).....	9
Figura 3.2 – Curva composta resultante da Figura 3.1	10
Figura 3.3 – Curvas compostas com subintervalos (Tabela 3.1).....	11
Figura 3.4 – Correntes quentes e frias, sem integração	12
Figura 3.5 – Correntes de processo integradas	12
Figura 3.6 – Maior integração	13
Figura 3.7 – O consumo mínimo de utilidades (limite termodinâmico)	13
Figura 3.8 – A associação entre o ΔT_{\min} e o consumo de utilidades	14
Figura 3.9 – Intervalos de população e CP's constantes	15
Figura 3.10 – A rede espaguete	15
Figura 3.11 – O efeito dos bicos das curvas compostas sobre a área mínima.....	17
Figura 3.12 – Um exemplo de curva “acidentada” (caso hipotético).....	17
Figura 3.13 – O consumo de utilidades – Variação ampla.....	18
Figura 3.14 – Consumo de utilidades – Variações discretas	18
Figura 3.15 – O custo anual dos equipamentos de troca térmica	19
Figura 3.16 – Todos os custos anuais e o ponto ótimo.....	20
Figura 3.17 – Problema com restrição concentrada na zona de “Pinch”.....	22
Figura 3.18 – Unidade típica de destilação de petróleo.....	23
Figura 3.19 - Destilação de petróleo, sem e com refeedor na torre de pré-flash.....	24
Figura 3.20 – Diagrama cascata do processo representado na Figura 3.19(a)	26
Figura 3.21 – As utilidades frias no diagrama cascata	27
Figura 3.22 – As utilidades quentes no diagrama cascata	28
Figura 3.23 – A vazão mínima de um óleo quente.....	29
Figura 3.24 – O conjunto ideal de utilidades para um caso hipotético.....	30
Figura 3.25 – Curvas compostas normais e balanceadas, para um mesmo processo	31
Figura 3.26 – A vinculação entre a área e o consumo de utilidades	34
Figura 3.27 – O ponto ótimo da rede nova e a posição genérica de redes existentes.....	35
Figura 3.28 – Caminhos alternativos para a otimização de redes existentes.....	36
Figura 3.29 – O caminho escolhido e sua intercessão com as retas do tempo de retorno....	37
Figura 4.1 – Rede sintetizada manualmente através do PDM.....	43

Figura 4.2 – Rede manual otimizada, coincidente com a da síntese automatizada.....	44
Figura 4.3 - Caso 4.2 - Síntese automatizada – Rede de menor custo	46
Figura 4.4 - Caso 4.2 - Síntese manual – Solução natural, com ramais	48
Figura 4.5 - Caso 4.2 - Síntese manual – Sem divisão em ramais	49
Figura 4.6 - Caso 4.3 - Síntese automatizada – Rede de menor custo	51
Figura 4.7 - Caso 4.3 - Síntese manual – Ramais deliberadamente utilizados.....	52
Figura 5.1 – Método proposto - Custos anuais de reaproveitamento	58
Figura 5.2 – Caso 5.1 - Rede existente	61
Figura 5.3 – Método tradicional – Caminhos do “retrofit”	63
Figura 5.4 – Método tradicional (α -constante) – Tempo de retorno (TR)	64
Figura 5.5 – Método proposto – Caso 5.1 – O custo anual em duas escalas diferentes	65
Figura 5.6 – Caso 5.1 – Método proposto - Rede otimizada	67
Figura 5.7 – Caso 5.2 – Método proposto – Custo anual x ΔT_{min} em duas escalas	70
Figura 5.8 – Caso 5.3 – Método proposto – Custo anual x ΔT_{min}	72
Figura 5.9 – Caso 5.3 (ampliação) – Método proposto - Rede otimizada.....	74

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Unidade de destilação de petróleo hipotética (correntes de <i>CP</i> variável)	11
Tabela 4.1 – Dados do Caso 4.1 – Exemplo acadêmico com 4 correntes	43
Tabela 4.2 – Caso 4.1 – Ponto ótimo aproximado de projeto e recursos esperados	43
Tabela 4.3 – Detalhes da rede mostrada na Figura 4.1	44
Tabela 4.4 – Detalhes da rede mostrada na Figura 4.2	45
Tabela 4.5 – Dados do Caso 4.2 – Unidade de coque simplificada	46
Tabela 4.6 – Caso 4.2 – Ponto ótimo aproximado de projeto e recursos esperados	46
Tabela 4.7 – Detalhes da rede mostrada na Figura 4.3	47
Tabela 4.8 – Detalhes da rede mostrada na Figura 4.4	48
Tabela 4.9 – Detalhes da rede mostrada na Figura 4.5	49
Tabela 4.10 – Dados do Caso 4.3 – Unidade de destilação de petróleo simplificada	50
Tabela 4.11 – Caso 4.3 – Ponto ótimo aproximado de projeto e recursos esperados	50
Tabela 4.12 – Detalhes da rede mostrada na Figura 4.6	51
Tabela 4.13 – Detalhes da rede mostrada na Figura 4.7	52
Tabela 5.1 – Dados do Caso 5.1 – Unidade de destilação de petróleo simplificada	61
Tabela 5.2 – Detalhes da rede mostrada na Figura 5.2	62
Tabela 5.3 – Objetivos da síntese (rede nova) e do “retrofit” (método tradicional)	63
Tabela 5.4 – Caso 5.1 – Método tradicional – Previsão financeira (α -constante)	64
Tabela 5.5 – Caso 5.1 – Método proposto – Custo anual e tempo de retorno (TR)	65
Tabela 5.6 – Detalhes da rede mostrada na Figura 5.6	67
Tabela 5.7 – Caso 5.2 (cascos mais baratos) – Método tradicional (α -constante)	69
Tabela 5.8 – Caso 5.2 (cascos mais baratos) - Previsões do método proposto	70
Tabela 5.9 – Caso 5.3 (ampliação de carga) – Previsões do método proposto	72
Tabela 5.10 – Detalhes da rede mostrada na Figura 5.9	74
Tabela 5.11 – Caso 5.1 – Método tradicional – Previsão financeira (α -incremental)	76

Nomenclatura

a	Coeficiente da equação de custo de trocadores ou cascos, Equação (4.1)
A	Área de troca térmica de um casco, trocador ou rede, conforme o caso, em m^2
A_{add}	Área adicional estimada, na reestruturação de uma rede, em m^2 , Equação (5.2)
A_e	Área existente efetiva, em m^2 , Equação (5.1)
A_{min}	Área mínima estimada para uma rede nova, em m^2 , Equação (3.3)
A_s	Área média dos cascos adicionais, na reestruturação de uma rede, em m^2
b	Coeficiente da equação de custo de trocadores ou cascos, Equação (4.1)
C	Custo de um trocador ou casco, em US\$, Equação (4.1)
C_a	Custo total da área, na reestruturação de uma rede, em US\$, Equação (5.5)
C_{add}	Custo da área adicional, na reestruturação de uma rede, em US\$, Equação (5.4)
C_{ns}	Custo médio dos cascos adicionais, na reestruturação de uma rede, em US\$
C_o	Custo de reutilização da rede original, em sua reestruturação, em US\$
CP	Capacidade calorífica da corrente, em W/K, Equação (3.1)
CP_{cc}	Capacidade calorífica da corrente composta, em W/K, Equação (3.2)
CP_i	Capacidade calorífica de cada corrente do intervalo, em W/K, Equação (3.2)
exp	Coeficiente da equação de custo de trocadores ou cascos, Equação (4.1)
E_r	Eficiência de reutilização da área existente, como utilizada na Equação (5.1)
h	Coeficiente de convecção na faixa de temperatura pertinente, em $W/(m^2.K)$
h_1, h_2	Coeficiente de convecção de cada corrente, em $W/(m^2.K)$, na Figura 3.9
h_i	Coef. convecção de cada corrente do intervalo, em $W/(m^2.K)$, na Equação (3.3)
n	Número de correntes em cada intervalo, na Equação (3.3)
N_{add}	Número de cascos adicionais, na reestruturação de uma rede, na Equação (5.3)
q_1, q_2	Carga térmica de cada corrente, em W, na Figura 3.9
q_i	Carga térmica de cada corrente do intervalo, em W, na Equação (3.3)
T	Temperatura, em K
T^*	Temperatura alterada (“interval temperature”), em K
T_1, T_2	Temperaturas de entrada e saída da corrente na rede, em K
U	Coeficiente global de troca térmica, em $W/(m^2.K)$
X_p	Medida de aproximação do limite termodinâmico, proposto por Ahmad (1988)

Variáveis iniciadas por letras gregas

α	Eficiência da área de uma rede existente, Equação (3.4)
ΔH	Varição de entalpia de uma corrente numa faixa de temperatura, em W
ΔT	Diferença de temperatura (ou variação, de uma corrente), em K
ΔT_{min}	Diferença mínima de temperatura nas curvas compostas, em K
ΔTML	Diferença de temperatura média logarítmica, em K

Siglas

<i>GCC</i>	Grand Composite Curve (diagrama cascata)
<i>PDM</i>	Pinch Design Method (método de projeto manual de redes novas)
<i>SA</i>	Simulated annealing (técnica usada na síntese automatizada)
<i>SPRINT</i>	Programa da Univ. Manchester, usado na síntese automatizada
<i>TR</i>	Tempo de retorno, em anos

Capítulo 1

Motivação, objetivos e metodologia

Conforme repetidas menções ao longo deste trabalho, nenhum método de projeto dedicado à reestruturação de redes de trocadores de calor conta hoje com um nível elevado ou mesmo satisfatório de aprovação, embora esta atividade seja tão ou mais freqüente (ou importante) que a própria montagem (síntese) de redes novas.

Esta situação é um pouco menos desconfortável quando o objetivo é a otimização, pura e simples, mas se agrava quando a rede original é incapaz de atender à nova condição operacional, como costuma acontecer em ampliações de carga e outras situações.

Para completar, esta carência de métodos não se refere apenas àqueles de domínio público, mas também a quaisquer outros produtos de uso restrito ou protegido.

No que se refere à síntese de redes novas, ao contrário, existe uma metodologia de origem termodinâmica que goza de grande aprovação, no meio industrial, conhecida como “Pinch Technology”. Neste mesmo contexto, em que a montagem da rede é conduzida por um engenheiro (ou especialista), em oposição à síntese automatizada, o método tradicional para a reestruturação de redes existentes, extensivamente analisado adiante, não conta com o mesmo nível de aprovação (assim como um outro método correlato, apenas citado nesta tese, que envolve um certo grau de automatismo e também não se fez muito popular).

De qualquer forma, considerando-se seu sucesso com relação a redes novas, seria natural esperar que a “Pinch Technology” também oferecesse melhores métodos para os projetos de reutilização ou otimização de redes existentes. Entretanto, por diversas razões, discutidas nesta tese, a linha termodinâmica de pesquisa acadêmica nesta área perdeu força, em favor dos métodos automatizados de síntese ou reestruturação de redes, que, por sua vez, também não produziram os resultados esperados.

Assim, os avanços práticos voltados para a reestruturação de redes de trocadores de calor foram pouco significativos, desde o final dos anos 80, tanto no contexto da “Pinch Technology” quanto na linha matemática ou automatizada.

Diante deste quadro, parecia razoável insistir na linha termodinâmica, embora isto pudesse ser visto como quase antiquado, tanto no meio acadêmico quanto no industrial.

A idéia central era a de adaptar o método de redes novas à reestruturação de redes existentes, para aproveitar todo o seu sucesso e ferramental. Para isto, fazia-se necessário demonstrar, antes de tudo, que o sucesso do método original permanece atual, inclusive com relação à obtenção de redes de custo próximo ao ótimo.

Para isto, nada melhor que compará-lo à síntese automatizada, cujos avanços nos últimos 20 anos foram significativos, e que é normalmente obsessiva com relação ao custo. Com exemplos bastante complexos, esta comparação é apresentada no Capítulo 4, e seus resultados justificaram a continuação de nosso projeto de pesquisa.

Restava, portanto, formular a adaptação pretendida e demonstrar sua validade, o que é feito no Capítulo 5, por comparação com o método tradicional, e, principalmente, pelo fato de que, em vários estudos de caso bastante complexos, os objetivos de projeto pré-estabelecidos pelo novo método revelaram-se bastante realistas, quando a rede foi remontada de acordo com suas sugestões.

Em tempo, o pequeno número de referências bibliográficas desta tese e o fato das principais delas serem relativamente antigas devem-se à referida situação peculiar em que se enquadra este assunto: o relativo abandono da linha de pesquisa termodinâmica, ao lado dos escassos resultados da linha matemática (para aplicações práticas).

Estas conclusões podem ser comprovadas através de três trabalhos extensos e mais recentes, usados no decorrer deste projeto como verdadeiras referências, pelo crédito de que são merecedores. No levantamento bibliográfico realizado por Furman & Sahinidis (2002), esta comprovação é implícita, já muitos trabalhos são citados sem uma análise detalhada. Nos livros de Smith (2005) e Kemp (2007), entretanto, ela é bastante explícita, tanto nos textos como na bibliografia dos capítulos correspondentes.

Curiosamente, Kemp (2007) chega a sugerir um procedimento baseado no método de redes novas, que, à primeira vista, teria uma certa semelhança com o método proposto nesta tese. Todavia, esta sugestão é feita de forma vaga, sem formulação específica e sem qualquer referência adicional, como se fosse um procedimento opcional, anterior aos outros dois métodos sugeridos.

Finalmente, a julgar por seus títulos, outros trabalhos recentes pareciam propor métodos semelhantes ao nosso, ou soluções definitivas para o problema, o que de fato não se verificou. Portanto, até onde sabemos, há razões para acreditar no ineditismo desta tese.

Capítulo 2

Introdução e revisão histórica

Nos últimos 40 ou 50 anos, o mundo industrial vem sendo forçado a adaptar-se à crescente valorização da energia e a uma preocupação mundial, também cada vez maior, em relação ao meio-ambiente e à conseqüente redução de emissões e despejos industriais. Neste mesmo período, a evolução dos computadores digitais ampliou e diversificou significativamente as linhas de pesquisa e desenvolvimento em geral, e especificamente, também em nossa área de interesse: a otimização ou integração energética de processos.

Historicamente, e mais ou menos acompanhando a tendência de sofisticação do processamento eletrônico, os primeiros métodos nesta área baseavam-se na experiência prévia dos projetistas (métodos heurísticos) e foram logo substituídos por duas linhas mais avançadas de pesquisa: a análise termodinâmica e os métodos automatizados, estes últimos representados principalmente por métodos numéricos, e eventualmente incorporando, em maior ou menor grau, regras ou informações oriundas das outras duas vertentes. Um painel bem amplo sobre as publicações nesta área é fornecido por Furman & Sahinidis (2002).

2.1 - Métodos heurísticos

Na montagem (ou síntese) de redes de trocadores de calor, a partir dos dados de processo, os métodos baseados no bom-senso e na experiência eram inicialmente a única alternativa e foram usados até o final da década de 70, quando começaram a surgir outras opções. Daí em diante, a heurística passou a um plano secundário, utilizada apenas para complementar as demais técnicas. Dentre os métodos deste tipo, pode-se destacar o de Ponton & Donaldson (1974), que gozou de razoável prestígio na indústria do petróleo. Sua única regra é bastante simples: em cada estágio, a corrente que requer o mais alto nível de temperatura em seu aquecimento deve ser atendida preferencialmente, utilizando a corrente mais quente disponível e maximizando a troca térmica entre elas, para minimizar o número de serviços (número de trocadores ou de unidades). Mais tarde, uma variante deste método passou a considerar as duas correntes mais quentes, em cada estágio, para criar soluções alternativas, já que a regra original oferecia uma única resposta para cada problema.

Independente do método específico, quando o custo combinado de investimento e energia passou a ser considerado mais seriamente, estes métodos não puderam oferecer soluções comprovadamente eficazes, pois as estruturas eram montadas originalmente sem esta preocupação. As regras de síntese naturalmente refletiam a preocupação com os custos, mas de forma indireta, e não existiam objetivos pré-estabelecidos a atingir, seja de custo, de investimento, ou de consumo de energia. Assim, ao final, não se podia garantir nem estimar a proximidade com relação a um custo ótimo, que era absolutamente desconhecido. Alguns métodos ofereciam maior flexibilidade na geração das redes e, ao final, podia-se recorrer à otimização automatizada, mas o resultado nunca podia ser considerado ótimo, mas apenas o melhor que o projetista e a metodologia permitiam alcançar. De qualquer maneira, mesmo preterida como linha de ação isolada, a heurística ainda é bastante utilizada pelos demais métodos (por exemplo, a maximização da carga térmica dos serviços é comumente adotada, para diminuir o número e o custo total instalado dos trocadores).

2.2 - Métodos termodinâmicos

Embora iniciada antes, a linha termodinâmica de pesquisa ganhou impulso a partir da tese de doutorado de Bodo Linnhoff (1978), que deu origem a um conjunto de métodos de grande sucesso, conhecido como “Pinch Technology”. Interessante salientar, aqui, que o Brasil, por meio da Petrobras, manifestou interesse imediato nesta tecnologia, muito antes que ela se consolidasse e atingisse todo o sucesso que encontrou em aplicações industriais. De fato, já em 1980, a Petrobras convidou o professor John Flower, orientador da tese de Linnhoff, para ministrar um curso no Rio de Janeiro, e, com isto, deu origem a um processo de aprendizagem nesta área, provavelmente antes da maioria de suas concorrentes.

A “Pinch Technology”, que será apresentada com mais detalhes adiante, tem como um dos diferenciais mais importantes o fato de poder estimar a área de troca requerida, de acordo com o nível de recuperação de energia, antes mesmo de se iniciar o projeto. Assim, estabelece um vínculo entre o custo anual dos equipamentos e o custo correspondente ao consumo de energia, permitindo encontrar o custo ótimo esperado. Portanto, antes mesmo de começar, o projetista já pode conhecer os principais objetivos do projeto: área da rede e consumo de energia. Naturalmente, a área de troca requerida é estimada, mas com precisão bastante satisfatória, em termos práticos.

Além disto, esta metodologia ultrapassa a barreira da análise termodinâmica e se constitui numa verdadeira ferramenta de síntese, que não apenas estabelece previamente os objetivos de projeto, mas provê instrumentos para alcançá-los, o que torna sua aplicação ainda mais segura e confortável, e garante resultados extremamente confiáveis.

Embora originária da citada tese, da Universidade de Leeds, a “Pinch Technology” desenvolveu-se principalmente na Universidade de Manchester, a partir dos primeiros anos da década de 80. Ali, sempre sob o comando do mesmo Linnhoff, foram montados cursos que logo evoluíram para o Mestrado e Doutorado e deram origem ao Centro de Integração de Processos, que logo se transformaria num Departamento, com grandes reflexos sobre a popularidade desta instituição, dentro da área de Engenharia ou Integração de Processos.

Um consórcio de pesquisas foi criado naquele Departamento, envolvendo suporte financeiro de várias empresas de todo o mundo, e, com isto, muitos outros trabalhos e teses de grande relevância foram publicados. Dentre estes, alguns simplesmente aprimoraram a aplicação original (redes de trocadores), enquanto outros estenderam a “Pinch Technology” a novas fronteiras: tratamento de despejos (“water pinch”), destilação, análise de processos integrada ao sistema de utilidades (“total site analysis”), etc.

Cronologicamente, pode-se dizer que esta tecnologia tornou-se madura na década de 80, a partir da tese de Ahmad (1985), que coroou uma série de estudos que construíram toda a base para este fechamento. Até aí, entretanto, sua aplicação estava limitada à síntese de redes novas. Logo em seguida, todavia, a tese de Tjoe (1986) estendeu sua aplicação à otimização de redes existentes, com reposicionamento de trocadores e eventual adição de área nova. Mais tarde, a tese de Hall (1989) contemplou o tratamento de problemas que envolviam múltiplas utilidades e, pouco depois, um artigo publicado por Hall et al. (1990) incluiu casos envolvendo trocadores de tipos e materiais diferentes. Com isto, a tecnologia cobria, então, a grande maioria dos problemas práticos reais.

Apesar de ter atingido sua maturidade por volta de 1985, e se consolidado por volta de 1990, a pesquisa na área permaneceu forte na Universidade de Manchester até meados dos anos 90. Daí em diante, inclusive talvez pelo fato de já se encontrar mais ou menos esgotada como linha de pesquisa, a vertente termodinâmica foi perdendo força no meio acadêmico, especificamente na área de síntese de redes de trocadores. Desta tendência não escapou nem mesmo sua principal fonte, a Universidade de Manchester.

De fato, depois de 1995, pouca novidade se publicou, no mundo todo, a respeito do que se poderia chamar “Pinch Technology” tradicional. Referências básicas continuaram existindo, mas, muitas vezes, sua abordagem real tendia mais à síntese automatizada ou à otimização. Enquanto isto, a publicação e a pesquisa explicitamente ligadas aos métodos automatizados cresceram bastante e hoje suplantam amplamente a linha termodinâmica.

Acontece que esta tendência, embora verdadeira, não pode ser vista como um sinal de insucesso ou obsolescência da “Pinch Technology”. Ao contrário, ela reflete tão somente a situação da pesquisa acadêmica, e não da aplicação prática dos métodos correspondentes, para a qual a linha automatizada ainda carece de produtos totalmente aceitos. São, portanto, situações completamente diferentes. A linha termodinâmica tem produtos confiáveis, mas o próprio fato de estar mais madura reduz seu potencial, em termos de pesquisa acadêmica. A síntese automatizada, por sua vez, ainda tem aplicação prática limitada, mas talvez por isto mesmo, parece muito mais atraente como linha de pesquisa. Além disto, vislumbra-se ali um potencial extra de ganho, oriundo da maior precisão que poderia agregar ao processo (o que, naturalmente, é limitado pela velocidade de processamento dos computadores). Em contrapartida, a “Pinch Technology” oferece a vantagem de que a topologia da rede advém do projetista, e não de uma síntese automatizada, tendo, portanto, muito mais chance de ter todas as qualidades exigidas pelo processo, inclusive contemplando aspectos intangíveis, como a continuidade e flexibilidade operacional, controle, segurança, etc.

2.3 - Métodos automatizados

A classificação natural dos métodos de síntese costuma referir-se à sua origem. Todavia, a linha matemática naturalmente implica numa síntese automatizada da rede, em oposição à montagem manual (que caracteriza os demais tipos de métodos), e esta diferença pode ser tão ou mais marcante que a própria origem do método. Assim, embora a síntese automatizada possa eventualmente valer-se, em maior ou menor grau, de regras heurísticas ou da própria “Pinch Technology”, preferiu-se, nesta revisão, opor principalmente a idéia da síntese manual à automatizada, em vez de simplesmente comparar os métodos de base termodinâmica àqueles de origem matemática, que, embora dominem amplamente os instrumentos de síntese automatizada, não representam sua exclusiva fonte de recursos.

Portanto, os métodos automatizados aqui considerados podem combinar, em maior ou menor grau, procedimentos baseados nas duas linhas básicas de síntese (termodinâmica e heurística), com técnicas numéricas de natureza diversa. A tendência, entretanto, é de que a preponderância da linha matemática (e computacional) neste tipo de “software” seja cada vez maior. Modernamente, é mais ou menos comum, por exemplo, a investigação sobre a síntese de superestruturas, que teriam a propriedade de representar todas ou quase todas as estruturas aceitáveis. A partir daí, técnicas de otimização específicas podem ser aplicadas para identificar subconjuntos que correspondam a soluções estruturalmente mais simples e, portanto, viáveis, buscando, ao mesmo tempo, o custo ótimo (agora, não mais baseado em estimativas, mas já incorporando cálculos de maior rigor, conforme a disponibilidade).

A otimização, aliás, é uma ferramenta computacional comum a todos os métodos, podendo conter elementos mais ou menos complexos de evolução estrutural, não apenas capazes de simplificar a estrutura por remoção de serviços, mas também de reposicionar e criar trocadores de calor. A diferença é que na “Pinch Technology” a otimização é feita “a posteriori”, a partir de uma rede original gerada manualmente, com objetivos baseados em estimativas, enquanto a síntese automatizada procura justamente conjugar esta etapa com a própria criação da estrutura ótima, e priorizando cálculos ao invés de estimativas.

A idéia é promissora, mas existem muitas dificuldades. A época em que as redes sintetizadas automaticamente eram absolutamente inaceitáveis já foi praticamente superada, mas, por outro lado, esta linha de pesquisa ainda não gerou produtos irrestritamente aceitos pela indústria. Não há, além disto, evidências de que redes assim geradas tenham vantagens tão significativas de custo que compensem eventuais prejuízos causados por uma topologia pouco adequada ao processo, ou menos adequada que a das redes montadas manualmente por um projetista experiente (conforme exemplificado no Capítulo 4).

Esta, aliás, é a grande vantagem da “Pinch Technology” tradicional. As redes são montadas manualmente, para atingir um custo ótimo previamente estabelecido (estimado), e o projetista consegue não apenas montar redes na faixa esperada de custo, mas, também, observar sua adequação ao processo, principalmente se o projeto for desenvolvido junto com o cliente. Na situação ideal, seja por experiência própria, seja pelo concurso de outros especialistas, a rede pode ainda contemplar virtudes relacionadas ao controle de processo, flexibilidade e continuidade operacional, etc. Na síntese automática, ao contrário, o normal é que a observação destes aspectos seja prejudicada por um foco exagerado no custo.

De qualquer forma, por seu potencial de ganho em determinadas aplicações e pelo aprendizado que pode requerer e produzir nos aspectos conceituais, a síntese automatizada vem tendo grande destaque na pesquisa voltada a esta atividade (como em outras). De fato, embora calcada em métodos matemáticos e computacionais, o conhecimento conceitual é sempre requerido, e isto promove desenvolvimento. Além disto, como outro subproduto positivo, esta alternativa exige e promove o desenvolvimento de métodos de cálculo mais precisos, já que conta com eles para exibir todo o seu potencial de vantagens.

É difícil situar exatamente seu início histórico, mas certamente pode-se identificar, dentre seus pioneiros e maiores expoentes, os professores Roger Sargent (Imperial College, Londres) e Ignacio Grossmann (Universidade Carnegie Mellon, em Pittsburgh, USA), cujo doutorado foi orientado justamente por Sargent e encerrou-se em 1977 (coincidentemente, quase simultaneamente ao de Linnhoff, publicado em 1978).

Mais ou menos nesta época, e inicialmente a partir principalmente destes pólos, começou a crescer a produção de trabalhos nesta linha de pesquisa, hoje cada vez mais ativa. Grossmann, aliás, acabou se destacando ainda mais que seu mestre e, não apenas orientou e publicou inúmeros trabalhos, mas deu origem a um grande e produtivo grupo de seguidores. Menos concentrada geograficamente que a linha termodinâmica, a alternativa matemática teve reflexos em Universidades de todo o mundo, inclusive no Brasil, não só na área de redes de trocadores, mas em muitos outros ramos da Engenharia de Processos.

A propósito, neste contexto, dois trabalhos brasileiros estão citados nesta tese, como exemplos da diversidade que esta linha pode exibir, tanto em seus princípios básicos quanto em relação ao volume de tratamento matemático envolvido. Por outro lado, métodos ou programas de síntese automatizada não são analisados em detalhe ou comparados entre si neste trabalho, embora seus resultados típicos venham a ser usados em comparações, mas sempre em oposição à linha termodinâmica, apenas, e não para estabelecer vantagens ou desvantagens entre as alternativas automatizadas. Em outras palavras, este trabalho não tem o objetivo de identificar as melhores técnicas ou programas disponíveis para a síntese automatizada, e apenas a linha termodinâmica (manual) é apresentada e discutida em mais detalhes. A própria comparação de resultados entre a síntese automatizada e a manual feita nesta tese não procura esgotar esta investigação nem explorar todos os seus aspectos. Com efeito, os resultados comparados da síntese automatizada são utilizados muito mais para demonstrar e confirmar as virtudes da “Pinch Technology” com relação ao custo ótimo.

Capítulo 3

A “Pinch Technology” tradicional

Com o apoio de estimativas econômicas a respeito da utilização de área e energia, esta tecnologia é, todavia, nitidamente baseada na análise termodinâmica. De fato, ela tem por base as chamadas curvas compostas, em que as correntes de processo, devidamente agrupadas como “quentes” ou “frias”, são representadas por segmentos de retas.

3.1 - Curvas compostas

Nesta definição, bem como no contexto desta tecnologia, é comum a referência à “capacidade calorífica” das correntes de processo, usualmente representada pelo jargão CP , que também será adotado aqui. Para qualquer intervalo de temperatura com variação linear da entalpia, esta capacidade calorífica é constante e pode ser calculada pela relação entre as variações de entalpia e a de temperatura, como representado na Equação (3.1).

$$CP = \frac{\Delta H}{\Delta T} \quad (3.1)$$

Como exemplo, três correntes frias de CP constante (para efeito de simplicidade) seriam representadas por retas no diagrama *Temperatura x Variação de Entalpia*, conforme mostrado na Figura 3.1.

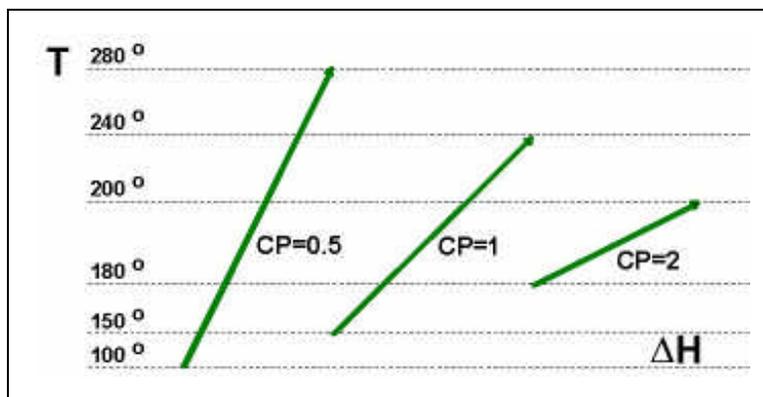


Figura 3.1 – 3 correntes frias de CP constante (em $\text{kW}/^\circ\text{C}$)

Para obter a chamada curva composta, basta perceber que, para cada intervalo de temperatura, a variação de entalpia do conjunto de correntes equivale à soma das variações individuais de cada corrente presente no intervalo. Isto corresponde a assumir, para cada intervalo, que a capacidade calorífica da corrente composta (CP_{cc}) é igual à soma das capacidades individuais (CP_i) das correntes presentes, como mostrado na Equação (3.2).

$$\text{Em cada intervalo de temperatura, } CP_{cc} = \sum CP_i \quad (3.2)$$

Assim, para o exemplo mostrado na Figura 3.1, a curva composta e as respectivas capacidades caloríficas em cada trecho estão representadas na Figura 3.2.

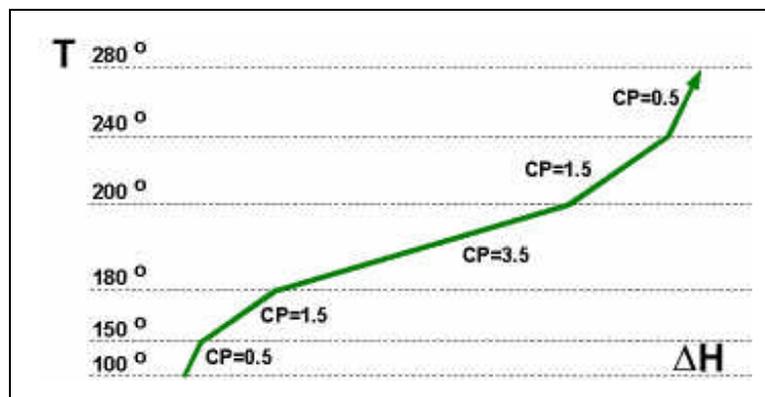


Figura 3.2 – Curva composta resultante da Figura 3.1

Como mencionado, a hipótese de CP constante foi aplicada neste exemplo, para todas as correntes, apenas para efeito de simplicidade. Na prática, correntes de CP variável, mesmo com mudanças bruscas, podem ser representadas de maneira semelhante, desde que sua evolução de temperatura seja convenientemente dividida em faixas de CP constante. A curva composta, nestes casos, teria um número maior de intervalos de temperatura, sendo que alguns deles, na verdade, corresponderiam aos “subintervalos” (intervalos usados para representar uma mesma corrente). Este artifício permite representar qualquer corrente e faz com que o conjunto de retas assumam um aspecto eventualmente mais curvilíneo, em clara evidência de sua fidelidade. Por outro lado, esta subdivisão faz com que a representação de correntes de CP variável seja conceitualmente simples e facilmente aplicável. Um exemplo mais completo e complexo, envolvendo as curvas compostas das correntes quentes e frias, com correntes de CP variável, é descrito e representado na Tabela 3.1 e Figura 3.3.

Tabela 3.1 – Unidade de destilação de petróleo hipotética (correntes de CP variável)

Id.	T_1	T_2	CP	h	Id.	T_1	T_2	CP	h	Id.	T_1	T_2	CP	h	
H1	278	259	78	1,28	H6	352	320	173	0,46	C1	119	225	129	0,70	
	259	240	76	1,26		320	289	168	0,44		C2	220	243	190	0,61
	240	220	74	1,24		289	257	162	0,42			243	257	194	0,62
	220	201	73	1,22		257	226	156	0,39			257	271	197	0,64
	201	182	71	1,20		H7	209	187	149			1,19	271	286	202
H2	182	147	93	0,84	187		164	145	1,11	286		300	204	0,66	
	147	111	88	0,78	164		142	140	1,02	300	380	280	0,70		
	111	76	83	0,70	142		119	136	0,92	C3	25	47	161	0,51	
	76	40	77	0,60	H8		195	187	300		1,61	47	71	171	0,63
	H3	238	188	13		0,91	187	178	300		1,46	71	94	180	0,67
188		139	13	0,83		178	169	293	1,27		94	117	187	0,68	
139		89	12	0,73		169	161	290	1,01		117	140	196	0,69	
89		40	10	0,60		H9	156	130	99	0,84	C4	132	143	200	0,70
H4		226	189	20	0,41		130	103	95	0,78		143	154	201	0,71
	189	153	19	0,38	103		77	91	0,71	154		164	218	0,74	
	153	116	17	0,33	77		50	86	0,61	164		175	214	0,78	
	116	80	16	0,27	Correntes H1 a H9 e C1 a C4					175		186	231	0,83	
	H5	369	349	113	0,66	T_1 e T_2 em $^{\circ}\text{C}$, CP em $\text{kW}/^{\circ}\text{C}$ e h em $\text{kW}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2)$					186	197	243	0,88	
349		329	112	0,63	197	208	265	0,94	197	208	265	0,94			
329		310	109	0,59	208	219	287	1,00	208	219	287	1,00			
310		290	107	0,55	219	230	324	1,05	219	230	324	1,05			

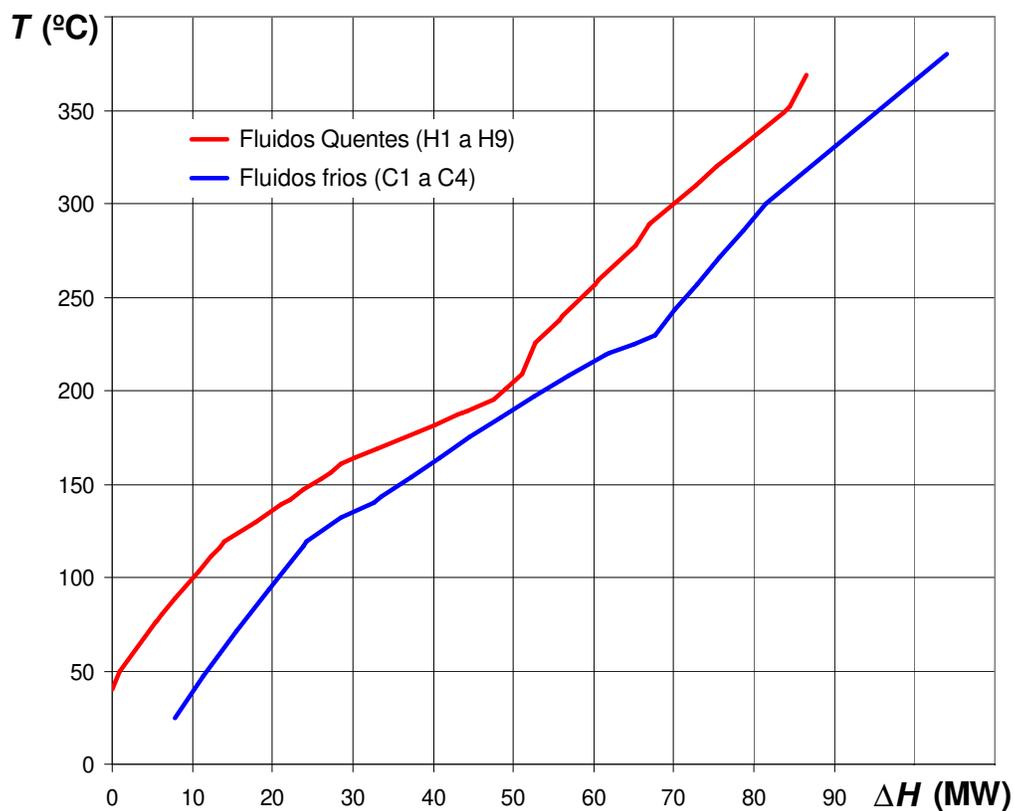


Figura 3.3 – Curvas compostas com subintervalos (Tabela 3.1)

3.2 - Consumo de energia x ΔT_{min}

A representação simultânea das curvas compostas das correntes quentes e frias de um processo industrial, naquele mesmo diagrama, dá ensejo a uma série de observações, ao mesmo tempo simples e importantes, que constituem a base daquilo que se convencionou chamar de análise termodinâmica. Na Figura 3.4, por exemplo, a demanda energética de cada grupo de correntes (quentes e frias) seria satisfeita exclusivamente por utilidades. Esta situação corresponde a uma condição extrema (ausência de integração entre as correntes de processo), provavelmente desvantajosa, do ponto de vista econômico, pois, nitidamente, há um potencial de troca de calor entre aquelas correntes.

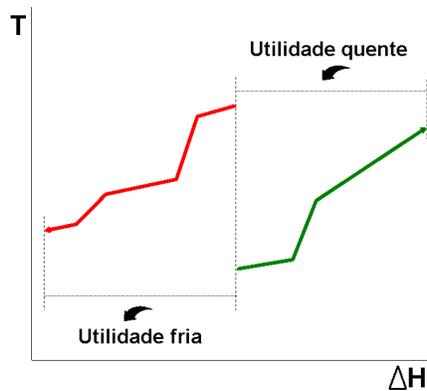


Figura 3.4 – Correntes quentes e frias, sem integração

De fato, as curvas compostas podem ser deslocadas na horizontal e apresentar uma área de superposição que representa a troca de calor entre as correntes de processo (e pode ser limitada termodinamicamente). Na Figura 3.5, pode-se ver que a superposição escolhida é termodinamicamente admissível, pois o ΔT nunca chega a ser crítico, e que o consumo de ambas as utilidades (quentes e frias) é reduzido exatamente daquele valor.

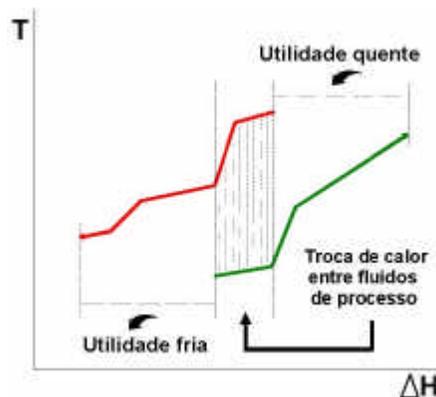


Figura 3.5 – Correntes de processo integradas

A integração entre as correntes de processo não somente reduz o consumo de utilidades, mas eventualmente até mesmo a área de troca requerida, pois os dois serviços (aquecimento e resfriamento), que seriam realizados em equipamentos diferentes, com suas respectivas áreas, passam a ser efetuados de uma só vez, num único trocador. Ao aumentar a integração, entretanto, este segundo efeito pode ser invertido, pois a maior aproximação entre as curvas (menor ΔT) exigiria áreas cada vez maiores para os trocadores. Isto fica visível na Figura 3.6, onde o mesmo exemplo é mostrado num nível maior de integração.

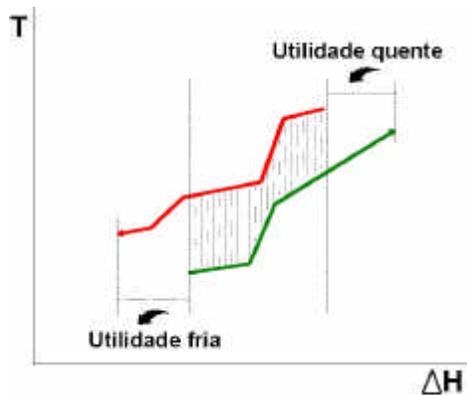


Figura 3.6 – Maior integração

Além disto, como mencionado, a integração entre as correntes de processo pode ser limitada termodinamicamente. A Figura 3.7 mostra exatamente esta situação, para o mesmo exemplo, e indica numericamente o consumo mínimo de utilidades (sem a ajuda deste diagrama, poderia parecer, neste exemplo, que as duas utilidades seriam dispensáveis, pois as cargas térmicas das correntes quentes e frias são idênticas e suas temperaturas extremas aparentemente permitiram que elas se auto-satisfizessem). Naturalmente, esta outra situação extrema também é inaceitável, por requerer área de troca infinita ($\Delta T = 0$).

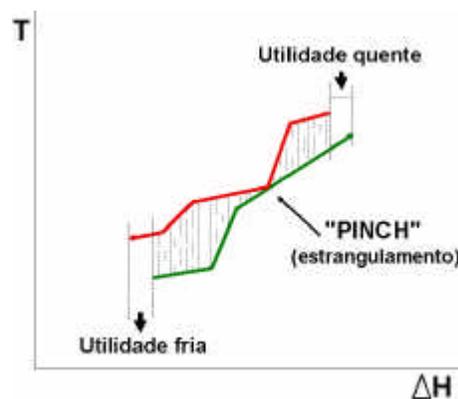


Figura 3.7 – O consumo mínimo de utilidades (limite termodinâmico)

Assim, como indicado na Figura 3.8, as curvas compostas indicam, e permitem que seja numericamente calculado, não só o limite termodinâmico, mas, ainda, para cada nível de consumo, o ponto de maior aproximação entre as curvas compostas (ΔT mínimo).

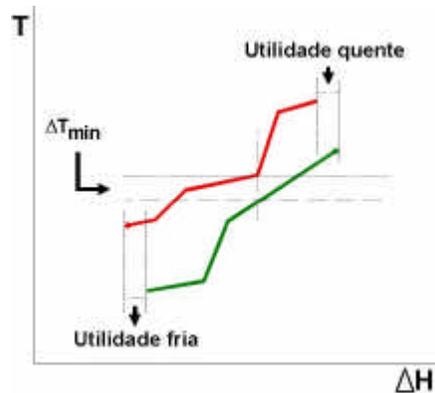


Figura 3.8 – A associação entre o ΔT_{\min} e o consumo de utilidades

A vinculação entre o consumo de utilidades e o ΔT mínimo é muito conveniente, pois, como mostrado a seguir, a área requerida pela rede de trocadores também pode ser associada ao ΔT mínimo. Assim, é possível utilizar esta variável para definir o nível ideal de integração entre os fluidos de processo, pela minimização dos custos anuais combinados (utilidades e área de troca requerida).

3.3 - Área estimada x ΔT_{\min}

Como mencionado no item anterior, a área de troca exigida pela rede de trocadores depende da aproximação entre as curvas compostas (ΔT mínimo) e, também, do fato de que a integração entre as correntes de processo reúne dois serviços num só equipamento, ou, em outras palavras, numa mesma área.

Felizmente, esta percepção qualitativa pode ser transformada em números, se for possível contar com valores estimados dos coeficientes de convecção das correntes. Estas estimativas nem ao menos precisam ser constantes ao longo de toda a faixa de temperatura da corrente. Na verdade, para calcular a área requerida, com precisão aproximada de 10%, basta que se disponha do coeficiente de convecção estimado em cada faixa de temperatura em que o CP da corrente foi considerado constante.

Para estimar a área requerida pela rede de trocadores, é preciso dividir as curvas compostas em intervalos, de tal forma que todas as correntes dos intervalos tenham CP constante. Isto está representado na Figura 3.9, e implica também na constatação de que, do início ao fim de cada intervalo assim definido, as correntes quentes e frias presentes são exatamente as mesmas (população constante). Conforme indicado na mesma figura, para cada corrente, em cada intervalo, se conhece, portanto, o coeficiente de convecção (h) e o calor trocado (q).

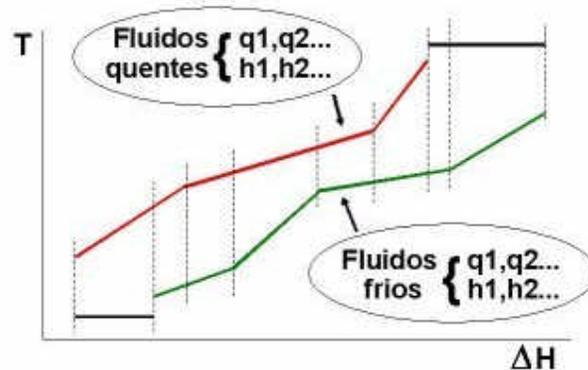


Figura 3.9 – Intervalos de população e CP s constantes

A estimativa da área mínima da rede é feita através da chamada “rede espaguete”, mostrada na Figura 3.10, em que cada corrente quente é dividida em tantos ramais quantas sejam as correntes frias, e vice-versa, com vazões nos ramais proporcionais às capacidades caloríficas das correntes a atender. Assim, todos os trocadores (indicados por dois círculos ligando as correntes), terão exatamente as mesmas temperaturas terminais, para ambas as correntes, pois, no intervalo, todas as correntes quentes apresentam exatamente a mesma variação de temperatura, assim como as frias.

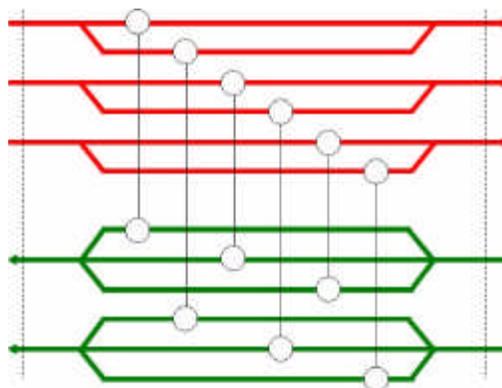


Figura 3.10 – A rede espaguete

Nesta configuração, assumindo que todos os trocadores sejam representados pelo perfil contracorrente, é possível calcular a área mínima requerida (A_{min}) em cada intervalo, utilizando um método simplificado. Este método é baseado na diferença de temperatura média logarítmica (ΔT_{ML}), que é igual, em todos os trocadores da rede espaguete. Para não perder precisão, este método exige, ainda, que o coeficiente global de troca (U) possa ser considerado constante ao longo dos trocadores, assim como o CP de ambas as correntes. Isto é plenamente atendido, neste caso, mesmo porque os intervalos podem ser tão estreitos quanto se queira. Portanto, a área da rede espaguete de cada intervalo com n correntes pode ser estimada com razoável precisão, através da Equação (3.3), onde, praticamente, a única fonte de erro se deveria aos coeficientes de convecção individuais estimados.

$$\text{Em cada intervalo de temperatura, } A_{min} = \frac{1}{\Delta T_{ML}} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{h_i} \quad (3.3)$$

A área mínima da rede é calculada através do somatório das áreas requeridas pela rede espaguete em cada intervalo. Contudo, como a área da rede espaguete não corresponde exatamente à área mínima, a estimativa assim feita pode apresentar um desvio de até 10%, aproximadamente, para qualquer lado, o que é bastante satisfatório, para efeitos práticos.

Por outro lado, antes de se iniciar o projeto da rede, existem ferramentas simples para determinar, aproximadamente, a quantidade de trocadores de calor exigidos em cada situação, tanto em relação ao número de serviços quanto ao de unidades básicas (número de cascos, no trocador de Casco & Tubos, por exemplo). Isto permite a conversão da área em investimento, admitindo que todos os trocadores teriam área igual à média. Naturalmente, esta simplificação introduz um erro adicional, mas ainda em escala bastante aceitável. Por fim, este investimento pode ser transformado em custo anual, para que o custo combinado (trocadores e utilidades) possa ser calculado conforme o ΔT_{min} , permitindo, então, que seja estabelecido o ΔT_{min} ótimo. Embora baseada em trocadores de perfil contracorrente, esta mesma técnica pode ser estendida, sem maiores dificuldades, a outras situações (como, por exemplo, ao perfil multipasse, encontrado em trocadores tipo Casco & Tubos). Da mesma forma, existem técnicas que permitem considerar situações mais complexas, inclusive com o uso de trocadores de tipos e materiais diferentes (diferentes equações de custo). Uma boa referência, para todos estes detalhes, foi publicada, em duas partes, por Linnhoff & Ahmad (1990) e Ahmad et al. (1990).

Embora a dependência da área mínima da rede com o ΔT mínimo seja usualmente mostrada como uma curva lisa, ela pode apresentar mudanças bruscas de inclinação (bicos). Isto se deve ao fato de que as curvas compostas são constituídas por uma série de retas, de diferentes inclinações, o que faz com que seu deslocamento relativo provoque uma variação do ΔT_{min} de diferente intensidade, conforme a inclinação da reta oposta ao bico responsável. Esta característica é demonstrada, de maneira genérica, na Figura 3.11, e exemplificada na Figura 3.12, com valores numéricos calculados a partir dos dados de um caso hipotético.

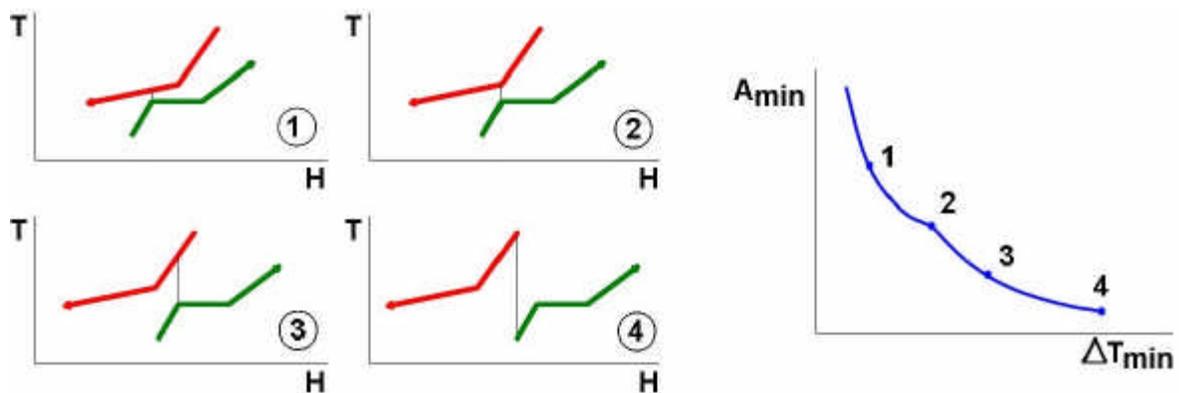


Figura 3.11 – O efeito dos bicos das curvas compostas sobre a área mínima

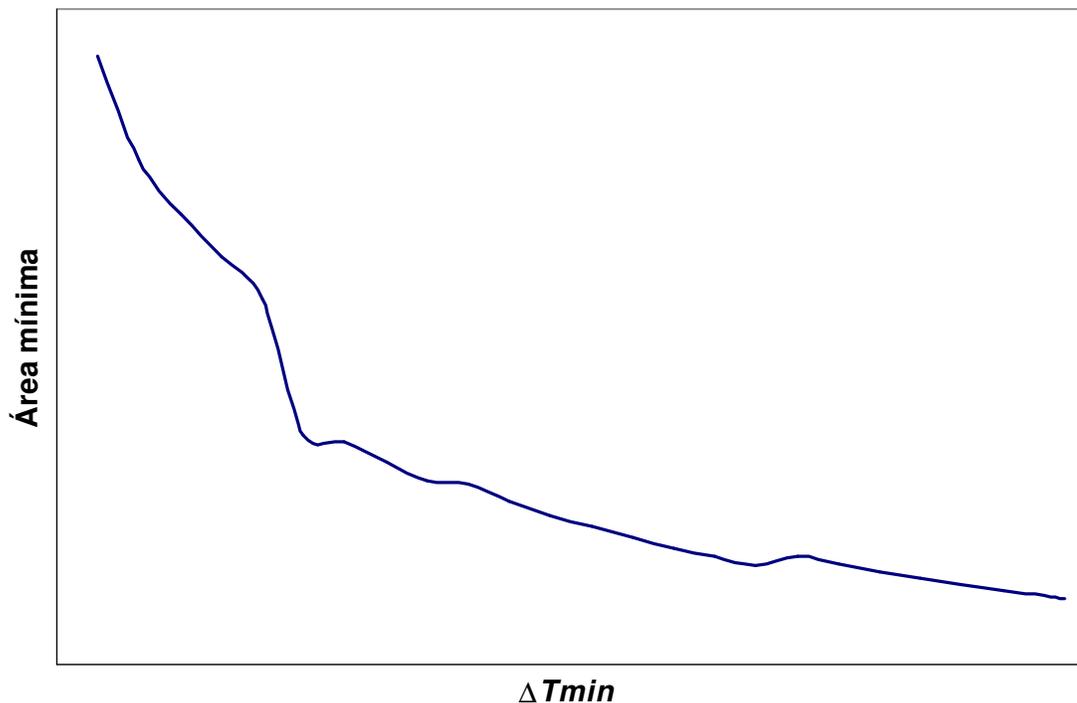


Figura 3.12 – Um exemplo de curva “acidentada” (caso hipotético)

3.4 - O ΔT_{min} ótimo

À semelhança do que ocorre com a área mínima, a curva que representa a relação do consumo de utilidades com o ΔT mínimo também pode ser “acidentada”, em virtude dos bicos que caracterizam as curvas compostas. Assim, embora genericamente o consumo de ambas as utilidades cresça (igualmente) com o aumento do ΔT_{min} , e sempre linearmente em cada trecho, a inclinação das várias retas subsequentes pode variar bastante e até apresentar um aspecto curvilíneo, como mostrado na Figura 3.13.

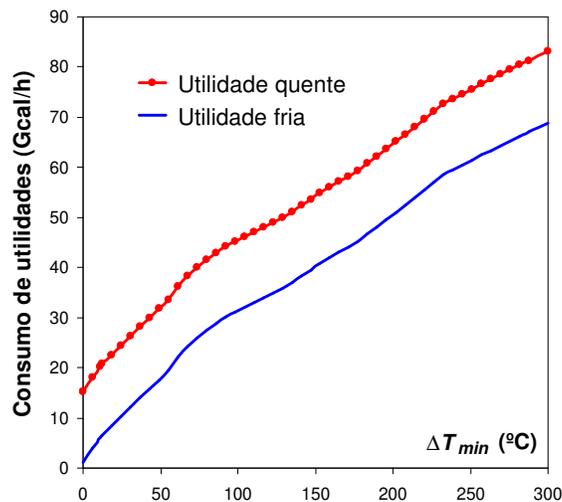


Figura 3.13 – O consumo de utilidades – Variação ampla

Mais comumente, a variação de consumo (e do custo) de utilidades é representada por retas bem caracterizadas, conforme a Figura 3.14 (apenas para a utilidade quente), até mesmo por conta de abrangerem, em geral, uma faixa menor de ΔT mínimo.

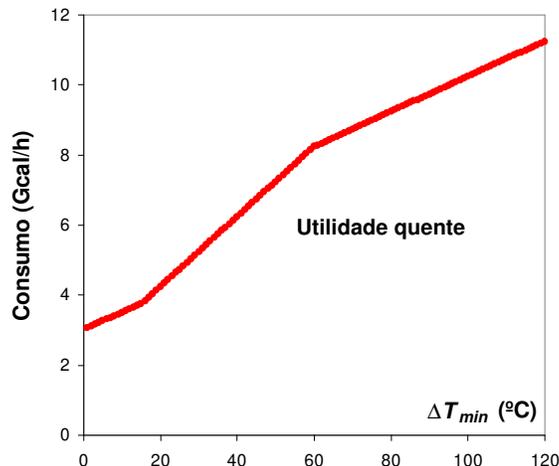


Figura 3.14 – Consumo de utilidades – Variações discretas

Ao contrário do consumo de utilidades, que sempre aumenta com o ΔT mínimo, a área mínima tende a diminuir, embora possa eventualmente aumentar, a partir de um certo ponto, pois o consumo maior de utilidades significa que um volume maior de serviços está duplicado (nos trocadores, o aquecimento e o resfriamento das correntes envolvidas é feito simultaneamente, numa única área, enquanto a substituição por utilidades implica em dois serviços distintos, com suas respectivas áreas).

Independente disto, o custo diferenciado dos equipamentos pode fazer com que o custo total (e anual) dos equipamentos de troca térmica aumente mesmo quando a área total diminui. Basta, por exemplo, que o custo dos aquecedores ou resfriadores apropriados seja significativamente maior que o dos trocadores, como ocorre quando se utilizam fornos, ou quando aqueles equipamentos exigem material mais nobre que o dos trocadores, em virtude de operarem em condições mais adversas (temperatura, pressão, etc.).

Assim, apesar do custo anual dos equipamentos de troca térmica ser normalmente mostrado como uma função decrescente do ΔT mínimo, não é nenhuma surpresa encontrar casos em que este custo aumenta a partir de determinado ponto (mesmo que a área continue caindo). A Figura 3.15, baseada nos dados da Tabela 3.1, demonstra exemplarmente esta situação que, embora absolutamente normal, não é muito comum quando se investiga uma faixa mais baixa de ΔT mínimo (onde normalmente se situa o custo ótimo).

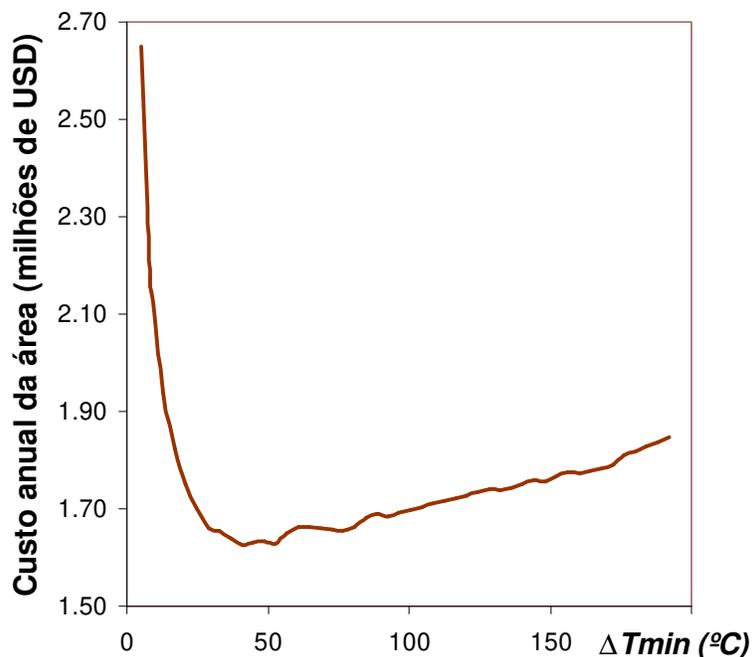


Figura 3.15 – O custo anual dos equipamentos de troca térmica

Para obtenção do custo combinado, os custos dos equipamentos de troca térmica e das utilidades podem e devem ser trazidos para uma base comum, normalmente anual. Isto é feito através de matemática financeira e do estabelecimento de alguns parâmetros simples (vida útil dos equipamentos, taxa de atratividade e tempo de operação anual). Desta forma, o custo combinado fica vinculado ao ΔT_{min} e a “Pinch Technology” permite que se descubra o ponto ótimo de projeto numa etapa absolutamente preliminar, antes de qualquer iniciativa relacionada à síntese da rede propriamente dita. E, utilizando novamente o exemplo listado na Tabela 3.1, o comportamento típico dos custos é apresentado na Figura 3.16.

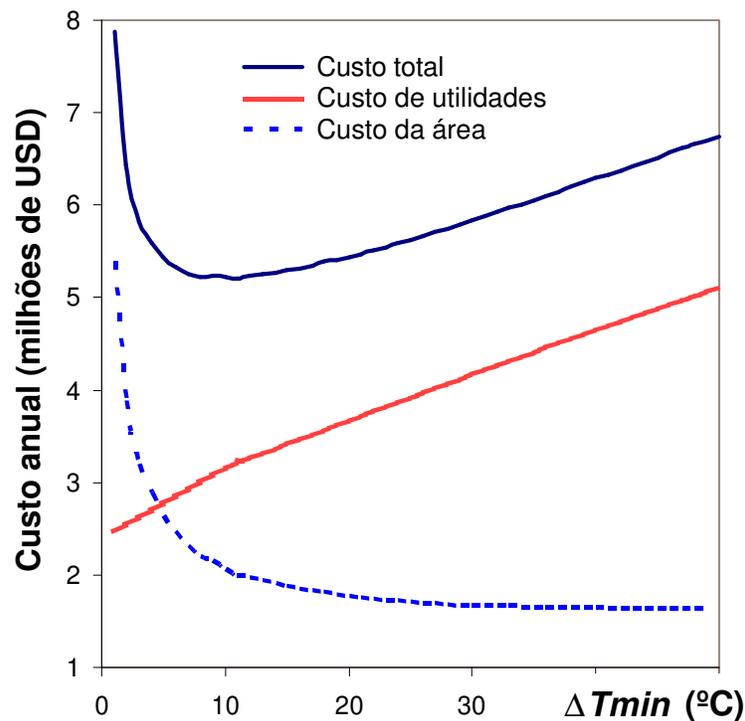


Figura 3.16 – Todos os custos anuais e o ponto ótimo

Esta etapa, em que se procura estabelecer “a priori” a proporção ideal entre o custo de utilidades e o investimento na rede de trocadores, dá origem a uma série de objetivos de projeto, e por isto, é chamada, em inglês, de “targeting”. E, muito embora baseados em dados estimados e calculados com algumas simplificações, os objetivos assim estabelecidos revelam-se ao mesmo tempo exequíveis e realistas. Em outras palavras, o nível ideal de consumo de utilidades definido desta maneira não é significativamente afastado do ponto ótimo real e, ao projetar a rede de trocadores, a área resultante também não será muito diferente da prevista pela “Pinch Technology”.

Além disto, como o custo total pode ser relativamente invariável na faixa próxima ao ponto ótimo, o resultado final nunca terá custo muito afastado do ótimo. Assim, se por acaso os objetivos apontarem para um consumo de energia um pouco acima do ideal, o investimento em trocadores seria mais baixo e compensaria quase completamente este desvio. Ao contrário, um investimento um pouco exagerado seria compensado por uma redução do consumo e, portanto, num caso ou noutro, o custo total anual não seria muito diferente, e nunca muito afastado do ótimo.

Com tal segurança, o projetista pode até deslocar um pouco os objetivos, conforme estratégias empresariais ou previsões de cenários futuros, e tanto mais quanto mais a curva do custo for horizontal na região próxima ao ponto ótimo. Assim, se as previsões indicarem uma tendência de aumento relativo do custo de energia, ou de sanções oficiais a emissões, por exemplo, o projetista pode deliberadamente deslocar seus objetivos do ponto ótimo, no sentido de reduzir o consumo de utilidades, já que o custo total seria (hoje) pouco afetado e teria tendência previsivelmente decrescente a médio e longo prazo, por conta desta decisão.

De qualquer forma, e independente da aplicação de estratégias adicionais, a “Pinch Technology” permite, talvez como sua principal virtude, a fixação preliminar e realista dos principais objetivos de projeto, que resultam na obtenção de redes de custo ótimo:

- Consumo de utilidades (quente e fria)
- Área mínima (ou área esperada) da rede
- Número de unidades (ou número de serviços)
- Número de elementos básicos de troca (por exemplo, cascos)
- Investimento (trocadores, resfriadores e aquecedores)
- Custo anual combinado (utilidades e equipamentos de troca)

Ao mesmo tempo, a “Pinch Technology” oferece todas as ferramentas para que os objetivos pré-fixados sejam atendidos na etapa seguinte, ou seja, na síntese de uma rede de trocadores (incluindo eventuais resfriadores e aquecedores) em que sejam realizados todos os serviços requeridos pelas correntes de processo.

Além dos objetivos listados, o ponto ótimo claramente indica o ΔT mínimo que se espera encontrar na rede de trocadores, e esta variável também acaba sendo tratada como um objetivo em si, devido à forte influência que ela exerce sobre as ferramentas de síntese (não detalhadas neste trabalho por não se enquadrarem em seu contexto).

3.5 - Outros aspectos da análise termodinâmica

Além de associar o consumo de utilidades ao ΔT mínimo, e evidenciar o limite termodinâmico de recuperação de energia, as curvas compostas permitem observações adicionais a respeito de características específicas de cada problema e dão ensejo e suporte a uma variada gama de outras análises sobre o próprio processo.

Por exemplo, a primeira informação relevante diz respeito à própria solução do problema, ou seja, à montagem da rede de trocadores. De fato, a síntese da rede será mais ou menos dificultada pelo comportamento do ΔT ao longo de toda a faixa de temperatura, e não apenas por seu valor junto ao “Pinch” (ponto de máxima restrição). O caso apresentado na Figura 3.17 ajuda a ilustrar esta conclusão, porque, ao contrário do exemplo utilizado até este ponto, apresenta uma tendência de maior abertura relativa entre as curvas compostas à medida que elas se afastam do “Pinch”. Com efeito, para um $\Delta T_{min} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, nota-se que, na maior parte da rede, os trocadores poderão e deverão ter folga de temperatura muito maior, facilitando e barateando sobremaneira seus projetos individuais, em comparação com casos em que as curvas permanecem próximas por intervalos maiores (Figura 3.19).

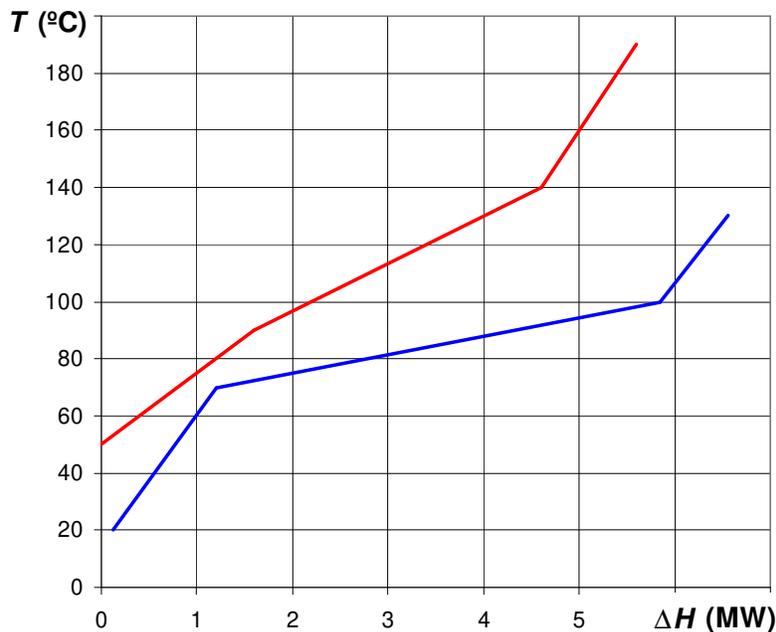


Figura 3.17 – Problema com restrição concentrada na zona de “Pinch”

Além desta aplicação, as curvas compostas permitem a análise do próprio processo industrial, não só para o estabelecimento de estratégias de projeto e o reconhecimento de situações típicas, mas até mesmo para promover alterações de processo.

A destilação de petróleo é um processo clássico, em que tal análise é possível e potencialmente vantajosa. Nestas unidades, principalmente as de larga escala, é comum o uso de uma torre de “pré-flash”, onde as frações mais leves do petróleo são removidas. A razão é simples: a vaporização das frações mais leves não exige temperaturas elevadas e, assim, evita-se que toda a carga precise ser aquecida no chamado forno atmosférico, em que a carga atinge a temperatura necessária para a vaporização das frações mais pesadas, que serão destiladas na torre atmosférica (a designação “atmosférica” do forno e da torre refere-se ao seu nível de pressão, em contraposição ao vácuo, usado numa torre adicional, em que as frações ainda mais pesadas podem ser eventualmente separadas).

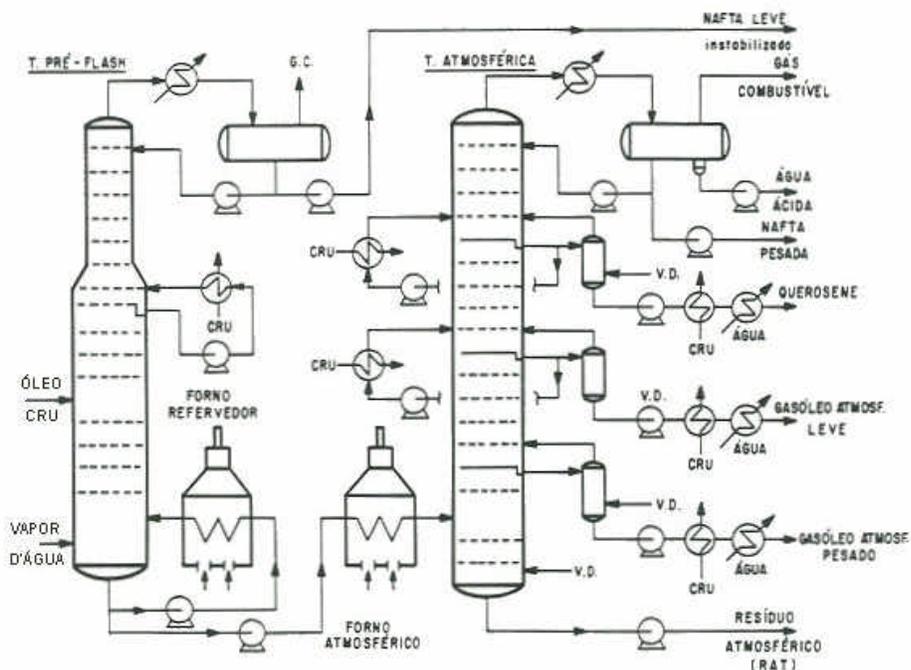


Figura 3.18 – Unidade típica de destilação de petróleo

No fundo da torre de pré-flash, utiliza-se comumente a injeção de vapor d’água, combinada ou não com um forno refervedor (Figura 3.18). Este vapor tem a finalidade de reduzir a pressão parcial dos hidrocarbonetos, permitindo sua vaporização em temperaturas mais baixas. A injeção é feita no fundo para garantir que a retirada de hidrocarbonetos leves pelo fundo da torre seja a mínima possível. Se a injeção de vapor for substituída pelo forno refervedor, o efeito seria semelhante, mas obtido através da elevação de temperatura do fundo da torre, e isto, em última análise, tende a aumentar o consumo de energia (nas duas opções, a carga do condensador de topo e o volume de refluxo de líquido tende a aumentar, por diferentes razões e diferentes taxas, e estes efeitos também podem ser estudados).

A injeção de vapor, por outro lado, dá origem ou contribui para o crescimento de outro tipo de problema: depois de condensada, a água será separada dos hidrocarbonetos e fará engrossar uma corrente chamada “água ácida”, cujos contaminantes exigem tratamento de despejos relativamente caro. Assim, como ambos têm vantagens e desvantagens, seu uso combinado talvez seja mais comum que o recurso isolado a um deles.

De qualquer forma, as curvas compostas retratam claramente os dois casos, como mostrado, com a correspondente região destacada, na Figura 3.19. No caso “a”, a exclusiva aplicação da injeção de vapor reduz a temperatura do fundo da torre, fazendo com que duas correntes (a carga original e o produto de fundo da torre pré-flash) requeiram aquecimento na mesma faixa de temperatura. O resultado é uma corrente composta com CP maior nesta região, e uma reta menos inclinada, como destacado na figura. Ao contrário, quando apenas o forno refervedor é utilizado para remover os leves, a temperatura de fundo é maior que a da carga, causando uma “descontinuidade” (reta vertical) na curva composta, já que aquela parte do aquecimento é realizada pelo refervedor, e nenhuma corrente precisa ser aquecida naquela faixa (caso “b”).

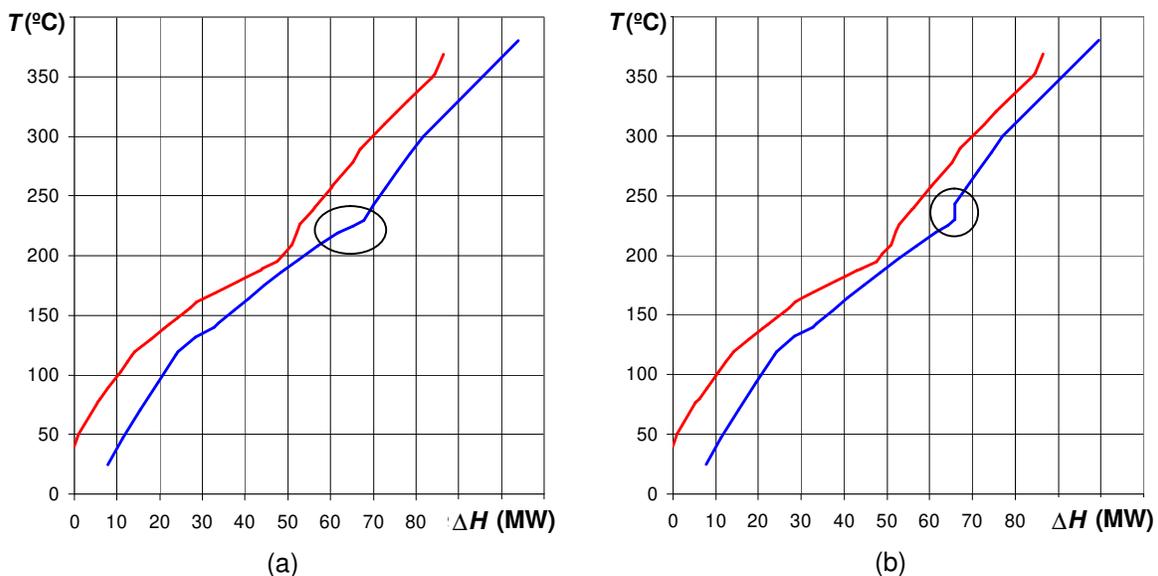


Figura 3.19 - Destilação de petróleo, sem (a) e com (b) refervedor na torre de pré-flash

O interessante é que, mais que simplesmente capazes de representar o processo, as curvas compostas podem ser usadas como suporte na comparação destas alternativas, assim como na análise de outras mudanças mais ou menos profundas no próprio processo.

Por exemplo, se o ponto de estrangulamento das curvas (“Pinch”) for causado pelo bico introduzido na curva composta das correntes frias pelo refeedor (o que não é o caso, na Figura 3.19b), a redução da carga do forno implicaria em uma vertical mais curta, e isto permitiria uma maior superposição das curvas, o que resultaria numa maior recuperação de calor para o mesmo ΔT mínimo. Esta mudança possivelmente teria outras implicações, mas as curvas compostas e a determinação do custo ótimo total contribuiriam certamente para uma análise completa desta modificação potencial. Da mesma forma, é claro, estas mesmas técnicas não podem ser esquecidas em qualquer estudo que vise estabelecer a combinação ideal de injeção de vapor e da carga do forno refeedor na torre de pré-flash. Ao passo que um simulador de processos seria necessário para se examinar as condições operacionais das torres e de seus equipamentos auxiliares, a “Pinch Technology” pode trazer as informações (estimadas) sobre os principais recursos envolvidos na recuperação e consumo de energia, incluindo seus equipamentos.

Uma espécie de subproduto muito importante da análise termodinâmica é que ela motiva um tratamento crítico dos dados e do processo, em geral, num tipo de atividade que normalmente gera alguns benefícios adicionais. Por exemplo, o nível de pressão das torres de destilação tem efeitos diretos sobre o processo, mas o “targeting” pode ser usado para estudar também seu impacto sobre a recuperação e consumo de energia, com todas as suas implicações econômicas, completando desta forma os dados para uma tomada mais segura das decisões pertinentes. Outro exemplo ainda mais periférico diz respeito a uma situação mais ou menos comum na destilação de petróleo. Nestas unidades, o rendimento de cada corte básico (gasolina, querosene, diesel, etc.) é mais ou menos definido pela composição do petróleo, em termos do tipo e volatilidade dos hidrocarbonetos presentes. Todavia, as especificações dos produtos finais permitem certa flexibilidade nos cortes, e isto é obtido através de ajustes operacionais, que normalmente afetam a pressão de operação e o refluxo interno, que, por sua vez têm reflexos no custo, seja de operação, seja de projeto.

A flexibilidade na forma de “cortar” o petróleo permite, então, que se considere a maximização dos produtos mais caros ou de maior demanda no mercado. O exagero nesta direção, todavia, traz penalidades energéticas que podem ser economicamente inaceitáveis. A “Pinch Technology”, em si, pouco ou nada tem a ver com estas decisões. Mas, na prática, ela provoca o questionamento sistemático dos dados e complementa o processo decisório, inclusive nesta questão, tornando tais análises mais corriqueiras.

A análise termodinâmica contempla, ainda, a seleção e a oportunidade de geração de utilidades. Nestas duas importantes funções, utiliza-se outro tipo de diagrama, que pode ser chamado “diagrama cascata” e é bastante referenciado por seu nome em inglês, “Grand Composite Curve” (GCC). Este diagrama, exemplificado na Figura 3.20, usa as chamadas “temperaturas alteradas” (T^*) ou “interval temperatures”, em inglês, com as temperaturas reais das correntes frias ou quentes, respectivamente, acrescidas ou diminuídas da metade do ΔT mínimo (se esta escala fosse usada nas curvas compostas, elas se tocariam, no ponto de maior estrangulamento). As temperaturas assim alteradas permitem dividir o problema em intervalos de temperatura, de tal forma que todos os fluidos quentes e frios presentes em cada intervalo respeitem, entre si, o ΔT mínimo. Isto viabiliza termodinamicamente a troca térmica entre os fluidos de processo de cada intervalo, e dá origem à chamada “cascata de energia”, através do reconhecimento de que o superávit de energia num intervalo pode ser utilizado pelos intervalos de nível de temperatura inferior (o contrário, obviamente, não é possível, pelo menos respeitando o ΔT mínimo). O algoritmo de construção deste diagrama, conhecido como “the problem table” e descrito em várias fontes, inclusive no recente livro de Smith (2005), é utilizado justamente para determinar o consumo de utilidades conforme o ΔT mínimo. Todavia, ao contrário das curvas compostas, as correntes quentes e frias não aparecem separadamente neste diagrama, onde a curva representa todo o processo (todas as correntes) e o consumo requerido das utilidades quentes e frias também pode ser observado.

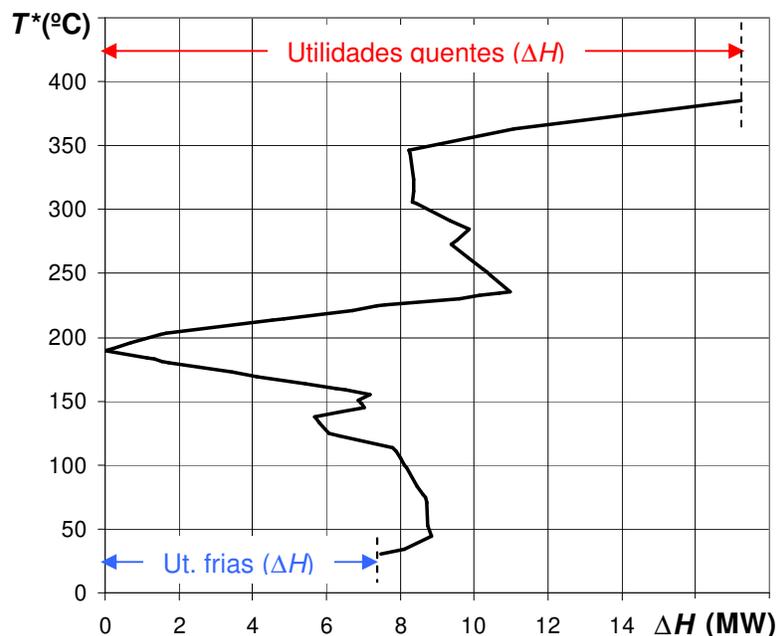


Figura 3.20 – Diagrama cascata do processo representado na Figura 3.19(a)

Utilidades podem ser representadas neste diagrama, onde as temperaturas alteradas permitem que as utilidades toquem a curva de processo, respeitando o ΔT mínimo. Assim, é possível determinar seus níveis exigidos de temperatura, selecionar o melhor conjunto de utilidades para cada problema e examinar oportunidades de geração de utilidades.

Na Figura 3.21, o caso anterior é repetido, com indicações relativas às utilidades frias. Por exemplo, o consumo total de utilidade fria, calculado através do algoritmo de construção do diagrama, seria de 7 465 kW. Pode-se ver, todavia, que todo este consumo de utilidade poderia ser substituído por uma geração de vapor, a partir de água saturada, desde que sua temperatura de saturação não ultrapasse um valor que, visualmente, parece ser pouco menor que 115 °C (como mencionado, o valor obtido no diagrama deve ser deduzido de metade do ΔT mínimo, no caso igual a 11 °C). O valor real, obtido do algoritmo, é de 110 °C. Por outro lado, haveria a opção, também indicada na figura, de gerar vapor com temperatura de saturação de 144,5 °C (e valores próximos), mas a energia disponível para isto seria menor (5 691 kW), e exigiria consumo complementar de utilidade fria (ou a geração de vapor adicional, num nível menor de temperatura).

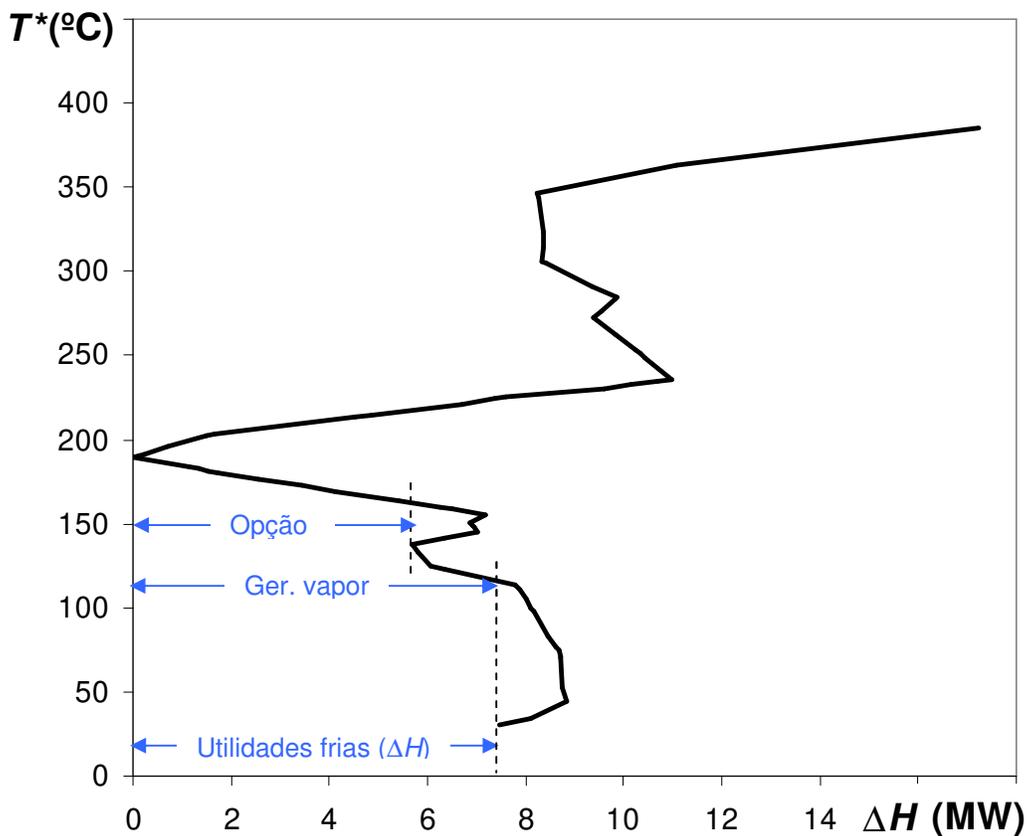


Figura 3.21 – As utilidades frias no diagrama cascata

A geração de vapor substitui uma despesa (consumo) por uma receita, mas carece de uma avaliação econômica mais completa, a que este diagrama dá suporte, em termos de potencialidade de geração e níveis de temperatura. Além disto, juntamente com os dados de custos relativos à aplicação de cada utilidade, ele permite definir o conjunto de utilidades mais adequado a cada processo, ao estabelecer a quantidade de energia que cada utilidade pode suprir ou remover, em função de seu nível de temperatura.

Por exemplo, reutilizando o exemplo anterior (Figura 3.22), é possível notar que quase a metade (8 232 kW) do consumo requerido de utilidades quentes (17 231 kW) pode ser fornecida por um vapor saturado. E, novamente, o diagrama cascata permitiria calcular a menor temperatura de saturação aceitável para este vapor, de maneira a respeitar o ΔT mínimo. Se o custo desta utilidade for menor que o das outras utilidades de maior nível de temperatura disponíveis, é bem possível, então, que a diferença destes custos compense os custos fixos de uma eventual instalação de duas utilidades ao invés de uma só (e estes custos fixos, naturalmente, podem ser levados em consideração e comparados ao custo operacional, numa mesma base).

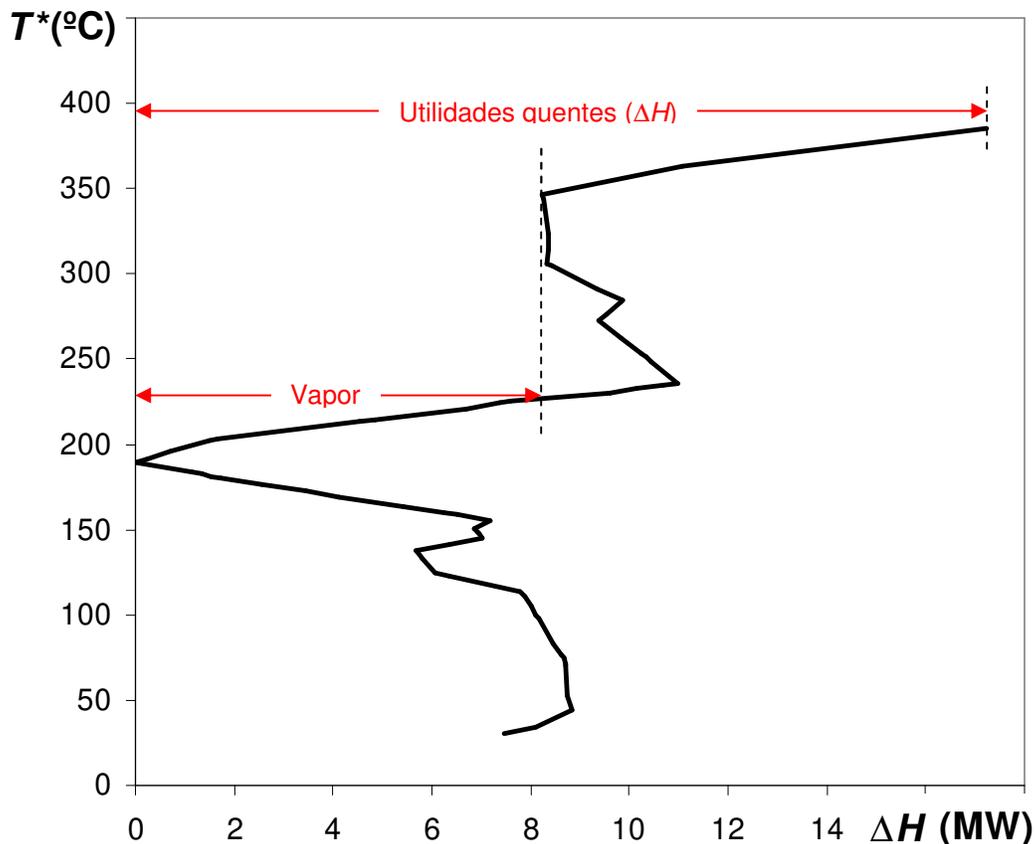


Figura 3.22 – As utilidades quentes no diagrama cascata

O diagrama cascata permite, ainda, visualizar e realizar cálculos termodinâmicos relativos a uma enorme variedade de análises, inclusive envolvendo oportunidades para a geração de trabalho útil (trabalho de eixo) e utilização de bombas de calor (“heat pumps”).

Outro tipo de cálculo muito comum e interessante, também apoiado pelo diagrama cascata, diz respeito à vazão mínima de um gás ou óleo quente requerido por um processo. Sempre lembrando que este diagrama utiliza temperaturas alteradas, é fácil concluir que a inclinação da reta de operação de uma utilidade é função de sua capacidade calorífica (*CP*) ou, em última análise, de sua vazão. Por exemplo, para atender plenamente a carga térmica a ser fornecida pelas utilidades quentes para o processo anterior, a Figura 3.23 representa a vazão mínima requerida por um óleo quente a 500 °C, e indica que tal vazão corresponderia a uma temperatura de retorno do óleo de aproximadamente 217 °C.

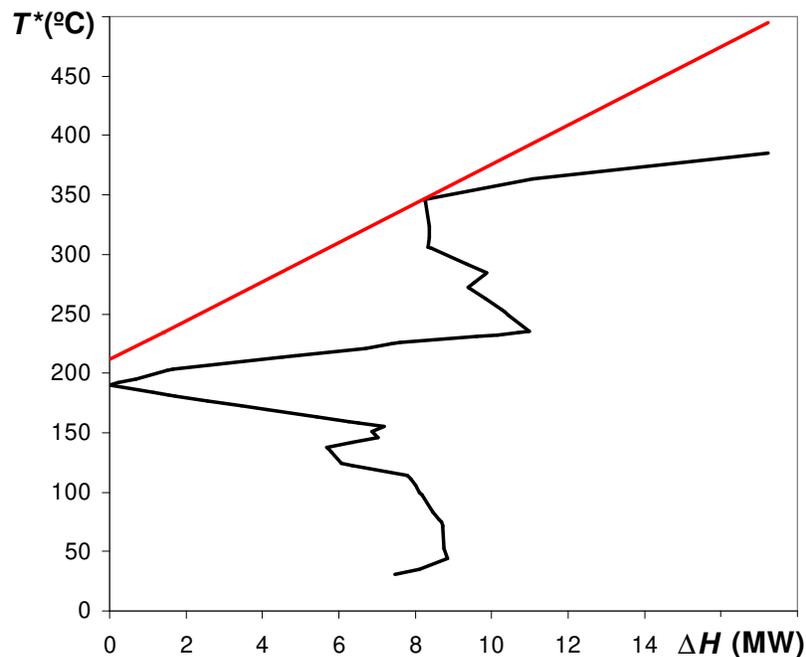


Figura 3.23 – A vazão mínima de um óleo quente

Neste exemplo, a vazão mínima do óleo foi determinada por um ponto saliente da curva que representa o processo no diagrama cascata. Em outros casos, entretanto, o ponto de contato pode ser o próprio “Pinch” (ponto em que a cascata de energia toca o eixo das temperaturas, indicando uma disponibilidade nula de energia, como de fato ocorre: a parte do processo superior ao “Pinch” é consumidora de energia, ao contrário da parte inferior, e nenhuma quantidade de energia deve atravessar aquela fronteira).

Outro exemplo, um pouco mais sofisticado e envolvendo duas utilidades quentes, é apresentado a seguir, para ilustrar a técnica utilizada na definição do melhor conjunto de utilidades para um dado processo. O processo escolhido é o mesmo representado na Figura 3.19a, e também usado na demonstração do diagrama cascata (Figura 3.20 e Figura 3.21), mas agora analisado para o seguinte conjunto fixo de utilidades:

- Utilidade quente nº 1: gás de forno, entrando a 800 °C e saindo a 200 °C
- Utilidade quente nº 2: vapor saturado, a 240 °C
- Utilidade fria substituída pela geração de vapor saturado a 110 °C

O diagrama cascata específico para este conjunto é apresentado na Figura 3.24, onde fica evidente que o vapor utilizado poderia ter temperatura ainda menor, pois sua linha não chega a tocar a curva do processo. Vê-se, ainda, que o gás de forno deve ser usado em duas etapas, pelo menos, para que sua temperatura de saída seja respeitada e, assim, não seja necessário usá-lo com vazão superior à vazão mínima (o que implicaria em desperdício maior de energia na chaminé do forno).

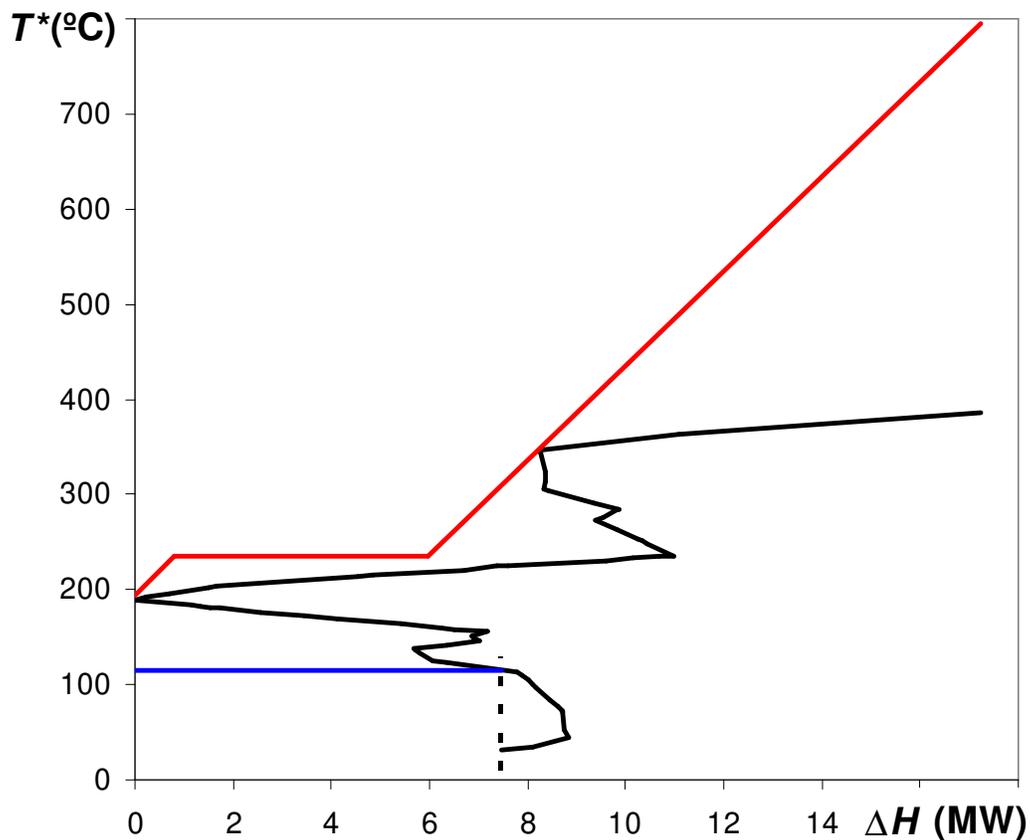


Figura 3.24 – O conjunto ideal de utilidades para um caso hipotético

Finalmente, mas ainda sem esgotar os recursos da análise termodinâmica, outro tipo muito útil de diagrama são as curvas compostas balanceadas, que incluem também as utilidades (além das correntes de processo). Assim, enquanto as curvas compostas normais dão uma idéia parcial do problema, as curvas balanceadas são absolutamente fiéis ao caso, pois o problema representado passa a ser exatamente aquele que será resolvido, com todas as utilidades pré-selecionadas.

Para exemplificar, a situação escolhida foi exatamente o exemplo anterior, com duas utilidades quentes (gás de forno e vapor saturado a 240 °C) e uma geração de vapor saturado, a partir da água saturada, a 110 °C, como única utilidade fria.

Nas curvas compostas balanceadas, pode-se ver, em destaque, as posições em que se espera utilizar e gerar vapor (Figura 3.25b). Além disto, a distribuição do ΔT ao longo de todo o processo pode ser observado de forma muito mais realista que nas curvas compostas normais, onde apenas as correntes de processo aparecem explicitamente (Figura 3.25a).

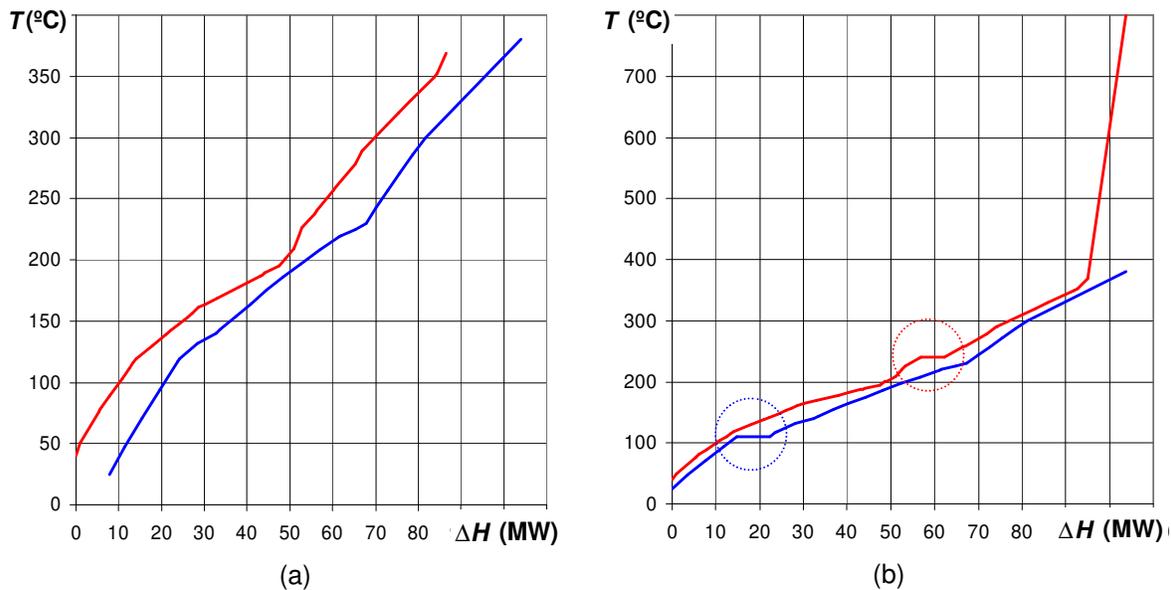


Figura 3.25 – Curvas compostas normais (a) e balanceadas (b), para um mesmo processo

3.6 - A síntese de redes novas

No que tange à integração energética das correntes de um processo industrial, a situação mais simples de resolver, pelo menos teoricamente, é a montagem de uma rede de trocadores completamente nova, para uma unidade também nova. Nestes casos, inexistem equipamentos a reaproveitar, tubulações existentes, bombas, etc., de tal forma que nenhuma restrição estrutural é imposta ao projetista, por conta da situação pré-existente. Na verdade, o único inconveniente, nesta aplicação, pode ser visto como uma vantagem: por também ser novo, o próprio processo é mais passível de sofrer modificações (e a análise termodinâmica costuma sugeri-las), e isto deixa o próprio problema um tanto ou quanto indefinido, já que as correntes de processo, a serem atendidas pela nova rede, costumam ser afetadas.

Em qualquer caso, para este tipo de aplicação, a “Pinch Technology” oferece todas as ferramentas para a completa solução do problema. Inicialmente, na etapa de “targeting”, discutida neste capítulo, são pré-estabelecidos os objetivos de projeto: custo, área de troca, consumo de utilidades, etc. Em seguida, na fase de síntese propriamente dita, a montagem da rede é auxiliada por uma série de regras simples e eficazes, baseadas no fato do “Pinch” dividir o processo em dois, e no número e “capacidade calorífica” das correntes vizinhas ao ponto de estrangulamento das curvas compostas (ΔT_{min}). Estas regras de síntese encontram-se detalhadas no livro de Smith (2005), mas não são discutidas e nem apresentadas nesta tese, por não se enquadrarem em seu contexto. Sua eficácia, todavia, é patente e notória: nas redes resultantes, não apenas o custo total, mas todos os demais objetivos são atingidos, se não exatamente, pelo menos muito aproximadamente. Outra significativa e incontestável vantagem desta metodologia é permitir que, desde o início da síntese, o projetista possa se preocupar não apenas com o custo total da rede, mas com todas as demais virtudes relativas à sua inserção no processo industrial: flexibilidade e confiabilidade operacional, facilidade de controle e otimização, etc. O pleno aproveitamento desta vantagem naturalmente requer a participação de um técnico com sólidos conhecimentos do processo industrial em questão, mas, genericamente, pode-se estimar que o tempo dedicado à análise termodinâmica e à preparação e crítica dos dados (incluindo o levantamento de parâmetros de custo e a tomada de decisões relativas ao processo), consome cerca de 3/4 ou mais do tempo de projeto e esta relação só tende a aumentar, quando o tempo total cresce. Em outras palavras, quanto maior o tempo de projeto, maior a duração da fase inicial. A síntese da rede, comparativamente, é mais simples e dificilmente será a maior responsável pela duração total do projeto.

A única crítica que se poderia fazer à “Pinch Technology” aplicada à síntese de redes novas é sua dependência de parâmetros estimados, na etapa de fixação dos objetivos. De fato, objetivos assim fixados poderiam ter desvios que eventualmente comprometessem o resultado final. Dois argumentos, entretanto, praticamente desmentem esta conclusão.

Em primeiro lugar, nenhum outro método disponível produz resultados melhores, significativa e consistentemente, mesmo que apenas o custo total seja observado. Quanto às demais virtudes mencionadas, as vantagens da “Pinch Technology” são ainda maiores. Por outro lado, com exceção da síntese automatizada, cuja aplicação prática ainda não é uma realidade, não haveria qualquer ganho de tempo se esta metodologia fosse abandonada.

Finalmente, o eventual impacto de objetivos mal fixados pode ser tratado de duas formas, ambas bastante eficazes. Nos casos mais críticos, o desvio será observado na etapa seguinte, em que os equipamentos são pré-projetados, individualmente. Nesta situação, o tratamento é mais drástico: na dúvida, pode ser necessário repetir a síntese, com objetivos redefinidos. A notícia boa é que, embora aparentemente custosa e demorada, esta repetição é quase indolor: a síntese, que normalmente já é a parte mais rápida do processo, fica ainda mais fácil quando repetida, porque o projetista já terá, então, uma intimidade muito maior com o problema e com seus aspectos e regiões de maior dificuldade.

Quanto aos desvios menos críticos, a solução é, naturalmente, ainda mais fácil e superficial. De fato, a síntese é feita “manualmente”, por um engenheiro, mas com o auxílio de “software” especializado. Ao final, geralmente, a rede obtida é otimizada, também em computador, sem alterar sua topologia (apenas a remoção de serviços é tolerada). Assim, a idéia da síntese manual é preservada, mas pequenos ganhos no custo no projeto podem ser obtidos de maneira natural e sistemática, por simples redistribuição das cargas térmicas.

3.7 - A otimização de redes existentes

Quando um sistema de recuperação de calor pré-existente é analisado, visando sua otimização, o problema se reveste de características bem diferentes do projeto de uma rede nova. Em primeiro lugar, há toda uma gama de restrições impostas pelo sistema existente e uma série de custos de difícil previsão (realinhamento e reaproveitamento de equipamentos existentes, principalmente). Além disto, o estabelecimento de objetivos semelhantes aos de uma rede nova não parecem não fazer muito sentido, assim como a própria idéia do custo ótimo ou do nível ideal de recuperação de energia.

Ao contrário, é mais fácil pensar em termos de tempo de retorno do investimento, já que, neste caso, a redução do consumo de utilidades deve compensar financeiramente a eventual adição de área de troca ao conjunto existente. Nesta análise, abandona-se o custo ótimo anual e trabalha-se com novos diagramas, onde novamente se explora a vinculação entre o ΔT mínimo, a área mínima da rede e o consumo de utilidades.

O primeiro destes diagramas, em que o ΔT mínimo não é explicitado, justamente mostra a relação entre a área mínima da rede e o custo de utilidades. A curva resultante é exemplificada na Figura 3.26 e corresponde a todas as redes cujo consumo de energia seja compatível com sua área de troca (num ponto qualquer, não representado, estaria, então, o ponto de custo ótimo, onde a soma destes dois custos teria seu mínimo). A região abaixo da curva, a menos de uma faixa de erro, causada por dados aproximados, representaria, assim, uma condição de absurdo termodinâmico (nenhuma rede real poderia se situar ali, pois de outra forma, teria área inferior à área mínima compatível com aquele consumo de energia).

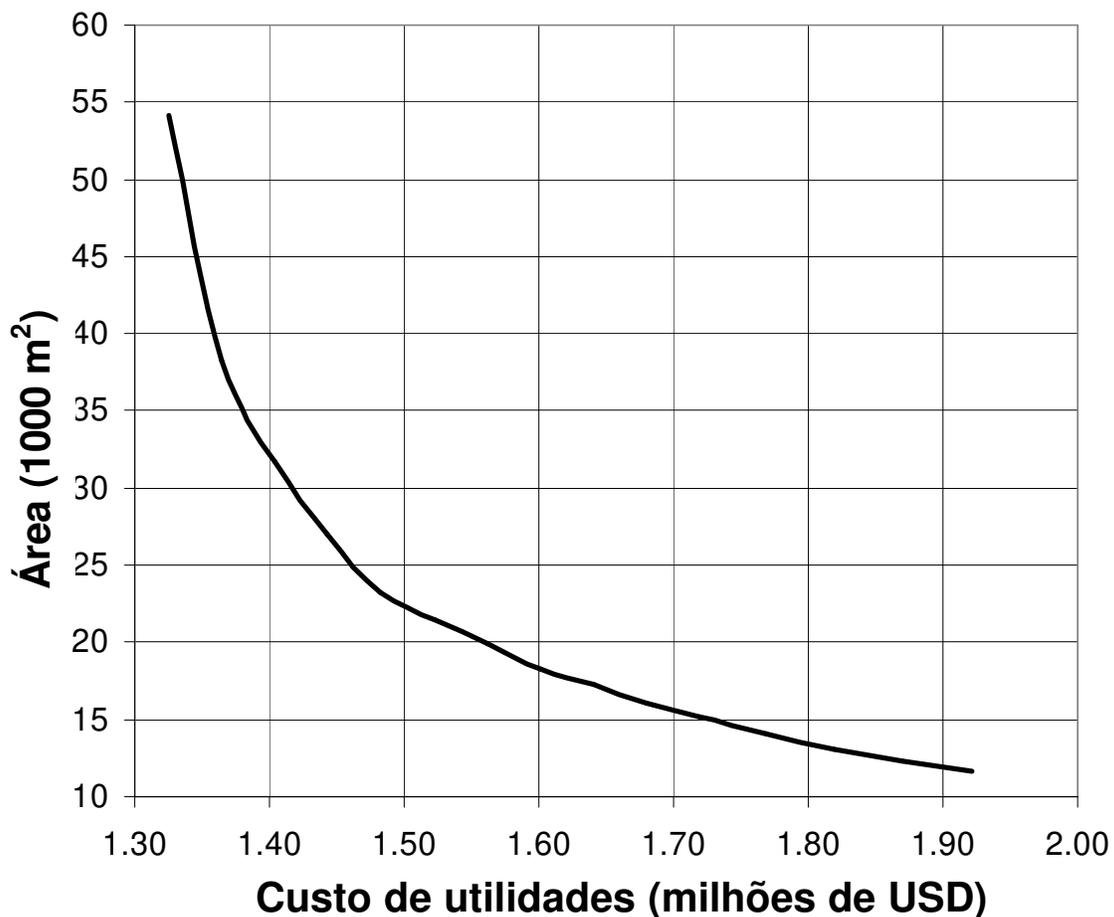


Figura 3.26 – A vinculação entre a área e o consumo de utilidades

Redes existentes, por sua vez, dificilmente se situariam sobre a curva que vincula a área mínima ao custo de utilidades. Ao contrário, pelo menos genericamente, um candidato à otimização deve ser algo ineficiente: no caso, como mostrado na Figura 3.27, deve ter um consumo de utilidades maior que o esperado, para a área existente, ou, visto de outra forma, uma área de troca superior à mínima, para o consumo observado.

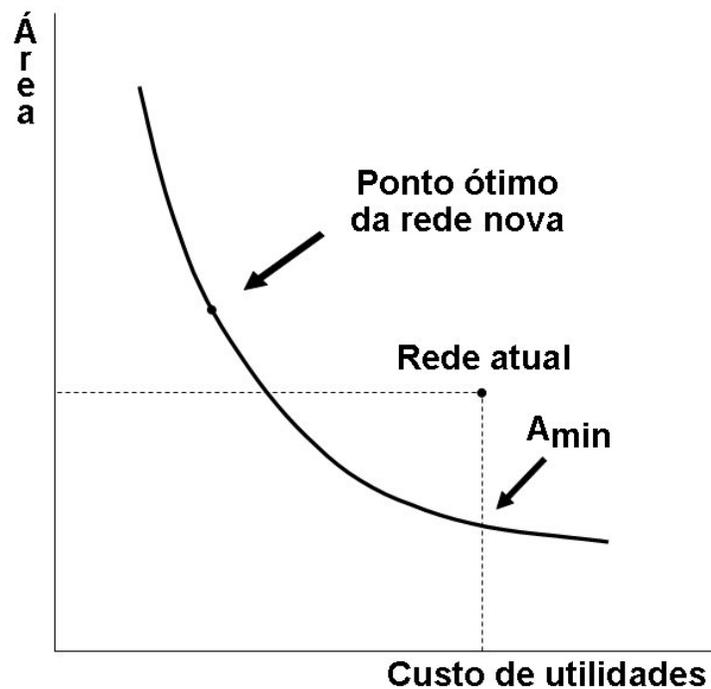


Figura 3.27 – O ponto ótimo da rede nova e a posição genérica de redes existentes

A ineficiência, ou, mais apropriadamente, a eficiência de uma rede existente pode ser medida, em termos de área, por exemplo, como mostrado na Equação (3.4).

$$\text{Eficiência da área} = \alpha = \frac{A_{\min}}{\text{Área}} \quad (3.4)$$

Com alguns detalhes técnicos, omitidos aqui por fugirem ao escopo desta tese, esta eficiência da área é a variável usada como base estratégica do método recomendado pela “Pinch Technology” tradicional para a otimização de redes existentes. Segundo tal método, publicado por Tjoe & Linnhoff (1986) com base na tese de doutorado de Tjoe (1986), vários caminhos poderiam ser percorridos pelo projetista na solução deste tipo de problema (e estes caminhos são indicados na Figura 3.28 e discutidos a seguir).

Os caminhos 1 e 2 são considerados inexecutáveis, pois buscam reduzir o consumo de utilidades sem adicionar área de troca à rede existente (sendo que o primeiro chegaria a descartar área, se a área existente for superior à área mínima da rede nova, como é o caso da Figura 3.28). De fato, a redução de consumo de utilidades sem a adição de área (ou com sua redução) teria como único recurso o realinhamento dos trocadores existentes, e poderia até ser viável, em pequeno grau, mas nunca como algo sistemático ou de maior vulto.

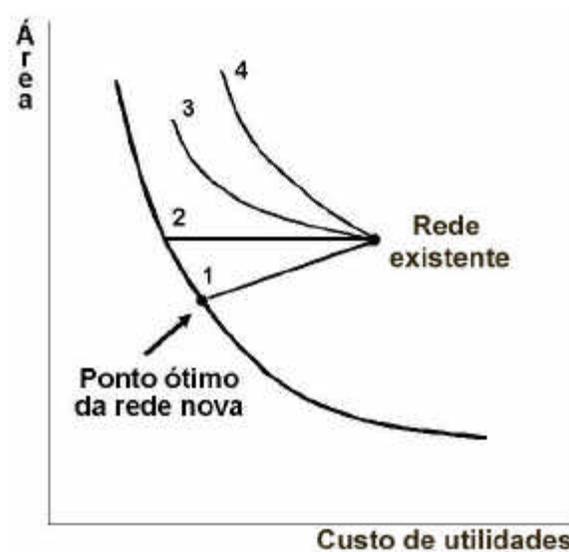


Figura 3.28 – Caminhos alternativos para a otimização de redes existentes

O caminho 3 pressupõe a adição de área à rede existente, mas sempre com 100% de eficiência, o que faria crescer, na maior taxa possível, a eficiência da rede final. Assim, se chegasse a ter área infinita, a rede atingiria eficiência de 100% (sem visar o ponto ótimo de um projeto novo, a rede teria, nesta condição, área de troca totalmente compatível com seu consumo de utilidades). Sempre de acordo com o autor, este caminho (α -incremental) ainda é um tanto ou quanto utópico, a menos que a eficiência original seja muito baixa.

O que se recomenda, quando a eficiência original já for mais ou menos alta (em torno de 80%), é o uso do caminho 4 (α -constante). A área adicionada apenas manteria a eficiência original, reconhecendo-se, então, que é relativamente difícil elevar a eficiência original de uma rede pela adição de área, quando esta eficiência já for razoavelmente alta. Ao contrário, quando ela for bastante baixa (por exemplo, 60%), o caminho 3 é executável e deve ser preferido, ao menos como primeira tentativa (se, durante o processo, ele ainda se revelar um objetivo muito difícil de alcançar, então o caminho 4, sempre ou quase sempre executável, embora menos ambicioso, deveria ser escolhido).

Uma vez definido o caminho a ser seguido, ele pode ser representado num outro diagrama, que explicita a relação entre o investimento e a economia de custo operacional (utilidades). Ali, é possível determinar, então, o nível de investimento compatível com o tempo de retorno desejado (Figura 3.29), e a conseqüente economia anual, pela redução do consumo de utilidades..

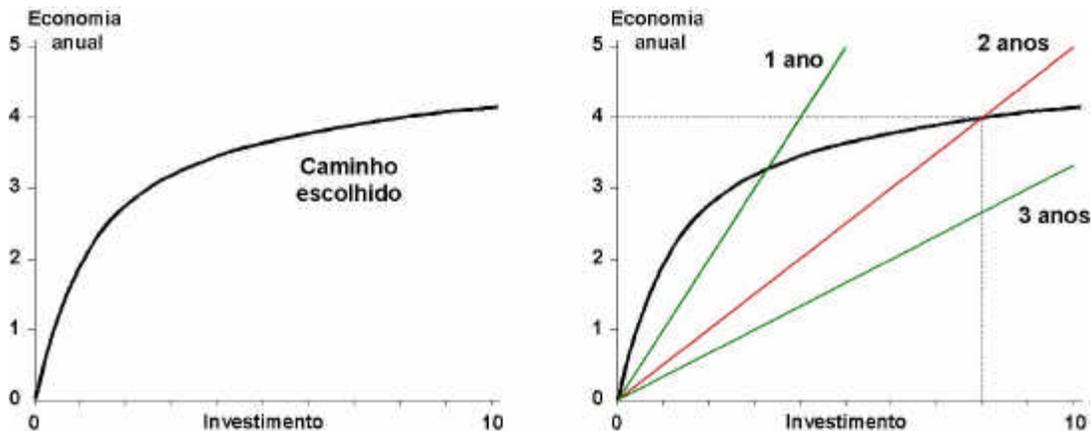


Figura 3.29 – O caminho escolhido e sua intercessão com as retas do tempo de retorno

A redução do consumo de utilidades define o novo consumo que, por sua vez, fixa o ΔT mínimo esperado na rede resultante, bem como todos os demais objetivos do projeto, incluindo a área adicional requerida, de acordo com o caminho escolhido para a eficiência de área. É importante notar que os objetivos de projeto fixados desta forma não estão presos a nenhuma idéia de ponto ótimo, e sim a um tempo de retorno pré-estabelecido pelo cliente. Por este mesmo motivo, o resultado final pode ter certas restrições para sua otimização, já que uma otimização automatizada do custo combinado (investimento e utilidades) poderia implicar num aumento do tempo de retorno, excedendo o limite originalmente imposto. Isto é uma característica do método, baseado no tempo de retorno e pode ser visto como uma de suas principais desvantagens ou fraquezas.

De qualquer forma, com objetivos fixados, o método sugere que, da rede existente, sejam retirados os trocadores que ferem as regras de síntese tradicionalmente utilizadas pela “Pinch Technology”, e que estas mesmas regras sejam observadas ao adicionar trocadores novos ou reposicionar aqueles que foram previamente removidos. Embora simples em sua concepção, este processo pode, todavia, ser bastante difícil, em termos práticos, devido às restrições que normalmente são impostas por qualquer problema envolvendo uma estrutura pré-existente (perda de carga, dificuldades de realinhamento e espaço físico, etc.).

Além de ser desvinculado da idéia do custo ótimo combinado, este método tem a desvantagem de estabelecer, em geral, objetivos relativamente modestos para a eficiência da área. Esta é uma observação pouco sustentável conceitualmente, em termos genéricos, mas que pode ser comprovada em casos práticos isolados. Portanto, ainda que acertada do ponto de vista geral, as estratégias sugeridas podem ser modestas, em casos específicos e, portanto, não transmitem plena confiança ao projetista.

Finalmente, outra limitação deste método é sua incapacidade de ser estendido a alguns outros tipos de cálculo envolvendo redes existentes. Por exemplo, seja por conta de ampliação, seja por qualquer outro motivo, se a rede existente, incluindo seus aquecedores e resfriadores, for incapaz de realizar os serviços requeridos por todas as correntes, não faz sentido falar em otimização, e muito menos, em tempo de retorno. De fato, nestes casos, um investimento mínimo é requerido para que o conjunto existente atenda às correntes de processo, e possa, a partir daí, ser otimizado ou investigado quanto ao tempo de retorno de seus investimentos. Acontece, todavia, que a determinação deste investimento mínimo não é contemplada pela “Pinch Technology” através de um método específico.

Portanto, em resumo, o método discutido neste item atende apenas a um tipo de cálculo (otimização de uma rede existente, baseada em tempo de retorno), e, mesmo nestes casos, estabelece objetivos eventualmente pouco ambiciosos.

3.8 - Reestruturação de redes existentes

O termo “reestruturação” é usado nesta tese para designar genericamente todos os casos envolvendo redes existentes, inclusive os restritos à sua otimização, como discutido no item anterior. Estariam incluídas, portanto, as ampliações de carga e quaisquer outras modificações no processo, mesmo quando a rede original, com os respectivos aquecedores e resfriadores, for incapaz de atender às novas condições operacionais.

A “Pinch Technology” tradicional não oferece, todavia, nenhum método com tal amplitude de cobertura. Aliás, este é exatamente o objetivo principal desta tese: propor um método capaz de contemplar, de forma genérica, a reestruturação de redes existentes, e não apenas sua otimização, baseada no tempo de retorno de eventuais investimentos.

Capítulo 4

Redes novas: Síntese manual x Síntese automatizada

A despeito do sucesso e popularidade da “Pinch Technology”, especialmente no projeto de redes novas (“grass root design”), a exaustiva revisão bibliográfica feita por Furman & Sahinidis (2002) revela um crescente interesse pela síntese automatizada de redes de trocadores, inclusive em relação ao citado tipo de aplicação.

Nesta tendência, que de certa forma se opõe à síntese manual, em geral associada ao “Pinch Design Method” (PDM), dois aspectos interessantes se fazem notar. Em primeiro lugar, este fenômeno se manifesta não apenas nas pesquisas e publicações acadêmicas, mas também entre os clientes ou usuários, ou seja, engenheiros e gerentes da área técnica. Por outro lado, todavia, o entusiasmo por esta linha alternativa é naturalmente menor entre os especialistas, desenvolvidos justamente no contexto da síntese manual, e isto merece uma análise mais detalhada.

De fato, embora a reação algo descrente dos especialistas em síntese manual diante da síntese automatizada possa ter componentes de emoção ou conservadorismo, também não seria absolutamente razoável desprezar as genuínas razões advindas de sua experiência, todas elas associadas às próprias expectativas que motivam os métodos automatizados.

Em primeiro lugar, para os casos mais complexos, a síntese manual pode tornar-se bastante difícil, principalmente aos olhos dos iniciantes. De fato, a montagem de uma rede de custo mínimo e, ao mesmo tempo, perfeitamente adequada ao processo pode levar uma semana ou mais, além de apresentar-se, inicialmente, como um problema quase insolúvel. Depois de algum tempo, entretanto, e de algum desconforto inicial, o projetista começa a familiarizar-se com o problema e a identificar seus “gargalos”, passando a gerar soluções alternativas com muito maior rapidez e segurança. Assim, por terem plena consciência desta característica, e das vantagens que a síntese manual normalmente apresenta com relação à adequação da rede ao processo, os especialistas naturalmente não consideram que esta dificuldade seja uma motivação razoável para a adoção da síntese automatizada, pelo menos de forma generalizada, e certamente este argumento faz sentido.

A outra grande motivação para a síntese automatizada é a precisão, já que o PDM é baseado em dados estimados (com relação ao tamanho dos trocadores), e seus resultados seriam questionáveis, quanto à otimização de custos.

Ao contrário, a síntese automatizada pode contemplar simultaneamente o projeto rigoroso dos equipamentos, durante o próprio processo de síntese, dando origem, assim, a redes potencialmente mais econômicas e mais confiáveis. Num plano menos ambicioso, ainda que utilizasse os mesmos dados estimados do PDM e os mesmos recursos de cálculo, a síntese automatizada poderia, ainda assim, produzir redes de menor custo total, devido à sua crescente capacidade de examinar um maior número de alternativas estruturais.

A síntese automatizada, portanto, conjugaria o conforto do projetista a uma maior precisão potencial, que aplicada simultaneamente ao processo de síntese, traria eventuais ganhos no custo final da rede. Aproveitada ao limite, esta capacidade chegaria, num plano ideal, ao ponto de dispensar especialistas, além de ser plenamente confiável, em termos de resultados, e imbatível, em termos de custos. Obviamente, com tal eficiência e eficácia, a síntese automatizada representa um desejo que todos gostariam de ver realizado.

Novamente, entretanto, os especialistas em projetos, de qualquer área, sabem que este nível de perfeição é muito pouco realista, pelo menos nos dias atuais, e que este plano ideal ainda teria contra si a realidade do mundo industrial. Neste contexto, um projeto leva de 3 a 5 anos para ser implantado, e quando finalmente a unidade entra em operação, quase sempre é pouco fiel às condições originais de projeto. Portanto, ganhos marginais de custo ou precisão são pouco significativos, e mais vale a adequação da rede ao processo. E neste aspecto, como já exaustivamente mencionado, a síntese manual oferece mais flexibilidade, sem comprometer o custo total.

Assim, na visão dos especialistas em síntese manual, o processo automatizado não teria um grande potencial de ganho, pelo menos a curto e médio prazo, ao contrário do que esperam os leigos. Além disto, dentro desta ótica, a adoção da síntese automatizada estaria associada, ainda, a dois riscos.

Usuários de sistemas automatizados teriam maior dificuldade de se transformarem em verdadeiros especialistas, por estarem submetidos a um processo menos exigente e, com isto, não poderiam trazer contribuições nem para o processo, nem para os resultados.

Como decorrência, redes inadequadas sob vários aspectos, inclusive custo, geradas por um “software” especializado, podem acabar sendo adotadas, por pura incompetência do usuário, não só para julgar os resultados, mas, sobretudo, para explorar todos os recursos do método e direcionar, na medida do possível, suas soluções.

Nesta visão, especialistas em síntese manual seriam, paradoxalmente, os melhores usuários de programas de síntese automática (pelo menos enquanto estes programas não forem perfeitos), e só isto já justificaria a manutenção da metodologia manual.

De qualquer forma, devido ao grande investimento na área, a síntese automatizada tende claramente a oferecer produtos cada vez mais sofisticados, precisos e efetivos. Assim, especialistas devem se preparar para tirar deles o maior proveito possível, expandindo seu arsenal de ferramentas. Para ilustrar toda esta discussão e esta última sugestão, este capítulo inclui uma comparação numérica, envolvendo dois exemplos bastante complexos.

4.1 - Bases de comparação

Como mencionado anteriormente, muito se tem publicado sobre a automatização da síntese de redes de trocadores de calor. Todavia, existem raras ferramentas disponíveis no mercado, para uso generalizado desta alternativa de síntese. Dentre elas, não apenas por conta da disponibilidade, mas também, e principalmente, por sua qualidade e modernidade, o programa SPRINT, desenvolvido pela Universidade de Manchester, foi escolhido como representante da síntese automatizada, para efeito de utilização neste trabalho.

De fato, este programa apresenta resultados bastante razoáveis, não apenas em termos de custo total anual das redes geradas, mas, também, em relação à praticidade das mesmas, observada através do número de unidades e de ramais.

A escolha do SPRINT, todavia, não tem o significado de recomendação do melhor instrumento, nem mesmo da melhor técnica, dentre as muitas que se pode aplicar à síntese automatizada, pois este não é o objetivo deste trabalho. A propósito, especificamente, este programa aplica uma técnica conhecida por seu nome em inglês, a “Simulated Annealing” (SA), bem descrita e discutida na Tese de Doutorado de Rodriguez (2005), daquela mesma Universidade, que, coincidentemente, foi também o principal pólo de desenvolvimento do PDM, que, na presente comparação, representa a síntese manual.

Uma das vantagens potenciais da síntese automatizada é a possibilidade de incluir, durante o próprio processo de síntese, o detalhamento rigoroso dos equipamentos. Com tal simultaneidade, a otimização da função custo poderia produzir resultados melhores que os da síntese manual, em que o projeto detalhado dos equipamentos é feito “a posteriori”, com reflexos bem mais limitados, especialmente sobre a estrutura da rede.

O programa SPRINT, todavia, não utiliza este rigor e, conseqüentemente, não tira proveito desta simultaneidade. Ao contrário, a área dos trocadores é calculada exatamente como se faz na síntese manual, ou seja, com coeficientes de convecção estimados e método simplificado clássico, em que o ΔT médio é a diferença de temperatura média logarítmica (contracorrente), multiplicada por um fator de correção. Em todo caso, o projeto simultâneo e rigoroso dos trocadores, aplicado durante o processo de síntese, ainda não é uma opção real, pois as ferramentas práticas correspondentes não estão disponíveis, para uso industrial generalizado, mesmo contando com muitos trabalhos acadêmicos publicados. Dentre estes, podem ser citadas duas teses elaboradas no Brasil, de Liporace (2000) e Mizutani (2003).

Assim, devido à inexistência de instrumentos, a presente comparação não inclui este tipo de síntese automatizada (com detalhamento simultâneo dos equipamentos). E, de resto, este nível de comparação exigiria um estudo muito mais extenso e, possivelmente, mais ambíguo, já que a síntese manual pressupõe etapas de detalhamento e otimização que corrigem os eventuais desvios causados pelos coeficientes de convecção originalmente estimados. De fato, a síntese manual pode ser refeita sempre que o projeto detalhado dos equipamentos assim o sugerir, em virtude dos desvios entre as estimativas originais e os resultados observados no projeto detalhado. Caso estes desvios sejam menos drásticos, a síntese não precisa ser refeita, mas o projeto rigoroso dos trocadores deve ser contemplado, de qualquer maneira, na fase final de otimização. Estes artifícios minimizam os desvios causados pelos parâmetros estimados, mas este processo completo de projeto dificultaria bastante a comparação com programas de síntese mais sofisticados (quando disponíveis).

4.2 - Estudo numérico - Caso 4.1

O primeiro caso utilizado para comparação é um exemplo acadêmico bem simples, descrito na Tabela 4.1. Para casos deste nível de simplicidade, espera-se que os resultados da síntese automatizada e do PDM sejam muito aproximados ou mesmo iguais, e isto, de fato, foi observado.

Como para todos os exemplos numéricos desta tese, o custo dos trocadores (ou de cada casco, no caso de trocadores tipo Casco & Tubos, em arranjo multipasse), é calculado através da Equação (4.1), em que a área (A) é expressa em m^2 e os parâmetros (a , b e exp) são característicos de cada tipo de trocador, material, etc. (na verdade, o parâmetro “ a ”, que representa eventuais custos fixos, pode ser algo independente do tipo de trocador).

Custo de trocadores ou cascos, em US\$: $C = a + b A^{exp}$ (4.1)

Tabela 4.1 – Dados do Caso 4.1 – Exemplo acadêmico com 4 correntes

Corrente	T_1	T_2	CP	H
1	190,0	90,0	10,000	0,50000
2	140,0	50,0	25,000	0,50000
T_1 e T_2 em °C, CP em kW/°C e h em kW/(°C.m²) Trocadores contracorrente Vida útil = 10 anos - Taxa de interesse anual = 0% Parâmetros da equação de custo (trocadores): $a = 10\,000$ $b = 1\,500$ $exp = 0,9$				
Corrente	T_1	T_2	CP	H
3	85,0	130,0	40,000	0,50000
4	40,0	130,0	20,000	0,50000
Utilidades				
Fria	30,0	45,0	-	0,81410
Quente	1 000,0	800,0	-	2,00000
Custo utilidades (fria/quente) = 5 e 95 US\$/kW.ano				

Para este caso, o ponto ótimo aproximado de projeto e demais recursos estimados pela “Pinch Technology” são mostrados na Tabela 4.2 (onde o ΔT_{min} de 10 °C corresponde ao ponto ótimo e apenas por coincidência reproduz um valor típico de literatura).

Tabela 4.2 – Caso 4.1 – Ponto ótimo aproximado de projeto e recursos esperados

ΔT_{min}	Consumo de utilidades		A_{min}	Nº unidades e cascos	Custos anuais (US\$/ano)		
	Quentes	Frias			Utilidades	Área	Total
10 °C	625 kW	275 kW	698 m²	07 / 07	60 750	73 092	133 842

Partindo destas informações, e aplicado rigorosamente, o PDM produz uma única rede como resposta para este caso, e esta primeira solução, obtida manualmente, é mostrada na Figura 4.1 e detalhada na Tabela 4.3. Como se pode observar, não apenas seu custo total, mas todas as suas características mostram grande alinhamento com os chamados “objetivos de projeto”, estabelecidos “a priori” pela “Pinch Technology”.

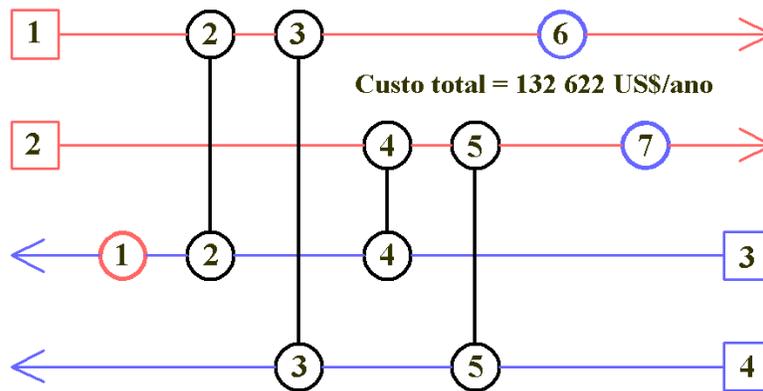


Figura 4.1 – Rede sintetizada manualmente através do PDM

Tabela 4.3 – Detalhes da rede mostrada na Figura 4.1

Trocador	Área (m ²)	ΔH (kW)	Trocador	Área (m ²)	ΔH (kW)
1 - Aquecedor	25,15	625,00	5	256,70	900,00
2	2,71	50,00	6 - Resfriador	2,91	50,00
3	136,40	900,00	7 - Resfriador	39,55	225,00
4	263,60	1 125,00			

Este alinhamento entre os objetivos pré-estabelecidos e o resultado final é comum, mesmo em casos mais complexos, e esta característica da “Pinch Technology” é justamente o que transmite segurança ao projetista. É verdade que, na rede sintetizada, os trocadores foram “projetados” com os mesmos parâmetros estimados usados no estabelecimento dos objetivos de projeto, e eventuais desvios nesta segunda fase, num projeto real, poderiam comprometer a precisão dos custos e recursos pré-estabelecidos. De qualquer forma, como já mencionado, existem estratégias para corrigir tais desvios, seja por otimização, durante o projeto detalhado dos trocadores, seja pela revisão dos objetivos e da própria síntese.

Ao ser otimizada, a rede original gerada pelo PDM tem duas unidades eliminadas (o trocador 2 e o resfriador 6). O resultado é apresentado na Figura 4.2 e Tabela 4.4, e seu custo anual, mesmo otimizado, continua compatível com as previsões. Por se tratar de um caso muito simples, esta rede coincide exatamente com a resposta mais ou menos natural do programa SPRINT (para outros exemplos simples, que foram testados mas não estão sendo apresentados, o programa exigiu alguns ajustes em seus parâmetros, para só então fornecer seus melhores resultados, em termos de custo). Para este caso, todavia, o resultado natural do SPRINT e o do PDM (após a otimização) foram absolutamente idênticos, e o tempo despendido nos dois métodos também não foi muito diferente, pois a síntese manual de casos tão simples também é muito rápida.

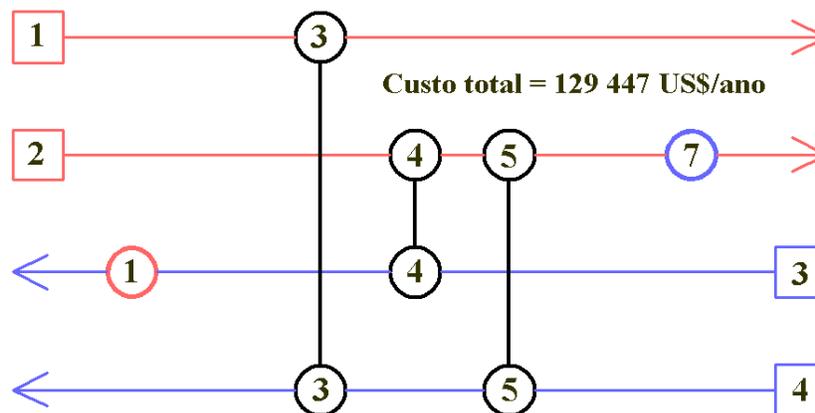


Figura 4.2 – Rede manual otimizada, coincidente com a da síntese automatizada

Tabela 4.4 – Detalhes da rede mostrada na Figura 4.2

Trocador	Área (m ²)	ΔH (kW)	Trocador	Área (m ²)	ΔH (kW)
1 - Aquecedor	25,47	633,64	5	187,86	800,00
3	143,34	1 000,00	7 - Resfriador	46,42	283,64
4	301,39	1 166,36			

4.3 - Estudo numérico - Caso 4.2

O segundo caso usado neste estudo é inspirado numa unidade real (coque) e serviu recentemente, na Petrobras, para avaliação do comportamento do programa SPRINT diante de casos reais. Naquela avaliação, o projeto fictício escolhido como o melhor resultado, não foi, na verdade, o de menor custo, pois as redes assim obtidas eram pouco satisfatórias, em termos de adequação ao processo. Para contornar esta limitação, algumas restrições tiveram que ser impostas à síntese automatizada, e isto tende a prejudicar o resultado, em termos de custo (dentre tais restrições, certos serviços podem ser tornados obrigatórios ou proibidos). Na presente comparação, entretanto, o resultado de menor custo da síntese automatizada foi tomado para comparação, para investigar mais amplamente o estabelecimento de objetivos associados ao PDM e o próprio método manual de síntese, colocado diante de uma situação relativamente mais difícil, em que o método automatizado tinha plena liberdade para buscar o custo ótimo (assim como o método manual). Em outras palavras, nenhuma restrição de processo foi introduzida, para tornar a comparação mais desfavorável à síntese manual.

Os dados deste novo caso estão resumidos na Tabela 4.5, enquanto os objetivos de projeto, conforme estimados pela “Pinch Technology” para o ponto ótimo aproximado, são apresentados na Tabela 4.6.

Deve ser salientada, neste caso, a utilização de trocadores tipo Casco & Tubos, em arranjo multipasse. Como usual neste tipo de perfil, foi fixado um parâmetro para seleção do número mínimo de passes no casco (que, na prática, corresponde ao número de cascos em série). Especificamente, como para todos os demais exemplos desta tese, foi usado um parâmetro termodinâmico formulado na tese de doutorado de Ahmad (1985), conhecido como parâmetro- X , ou, simplesmente X_p . Além disto, foi estabelecida uma área máxima por casco, conforme uma prática comum em projetos industriais, para evitar equipamentos de tamanho exagerado e os conseqüentes problemas de manutenção ou transporte.

Tabela 4.5 – Dados do Caso 4.2 – Unidade de coque simplificada

Corrente	T_1	T_2	CP	h
1	232,0	145,0	110,95300	1,395600
2	265,0	145,0	31,98250	0,721060
3	364,0	80,0	37,92280	1,023440
4	232,0	182,0	325,64000	1,511900
5	375,0	265,0	123,70100	1,407230
6	375,0	277,0	94,93880	1,337450
14	325,0	265,0	317,88700	1,837540

Corrente	T_1	T_2	CP	h
7	150,0	370,0	311,36700	1,744500
8	144,0	184,0	348,90000	1,442120
11	116,0	150,0	69,47960	0,930400
12	220,0	240,0	207,95600	2,528360
13	220,0	240,0	465,20000	2,528360

Utilidades				
Fria	30,0	45,0	-	0,814100
Quente	1 000,0	800,0	-	2,000000

T_1 e T_2 em °C, CP em kW/°C e h em kW/(°C.m²)
 Área máxima por casco = 700 m²
Parâmetros da equação de custo (trocadores):
 $a = 0$ $b = 37\ 098$ $exp = 0,558$

Troc. multipasse - Fator de Ahmad (X_p) máximo = 0,9
 Vida útil = 10 anos - Taxa de interesse anual = 8,5%
 Custo utilidades (fria/quente) = 49 e 152,3 U\$/kW.ano

Tabela 4.6 – Caso 4.2 – Ponto ótimo aproximado de projeto e recursos esperados

ΔT_{min}	Consumo de utilidades		A_{min}	Nº unidades e cascos	Custos anuais (US\$/ano)		
	Quentes	Frias			Utilidades	Área	Total
28 °C	21 158 kW	5 403 kW	2 420 m ²	16 / 16	3 487 040	2 981 820	6 468 860

Para este caso, a rede de menor custo produzida pela síntese automática é mostrada na Figura 4.3 e detalhada na Tabela 4.7. Pode-se registrar, novamente, grande alinhamento entre o custo anual previsto pela “Pinch Technology” e o observado na rede, mas a previsão não se revela tão precisa quanto aos demais recursos (nas redes sintetizadas manualmente, todavia, se poderá ver que mesmo este alinhamento permanece).

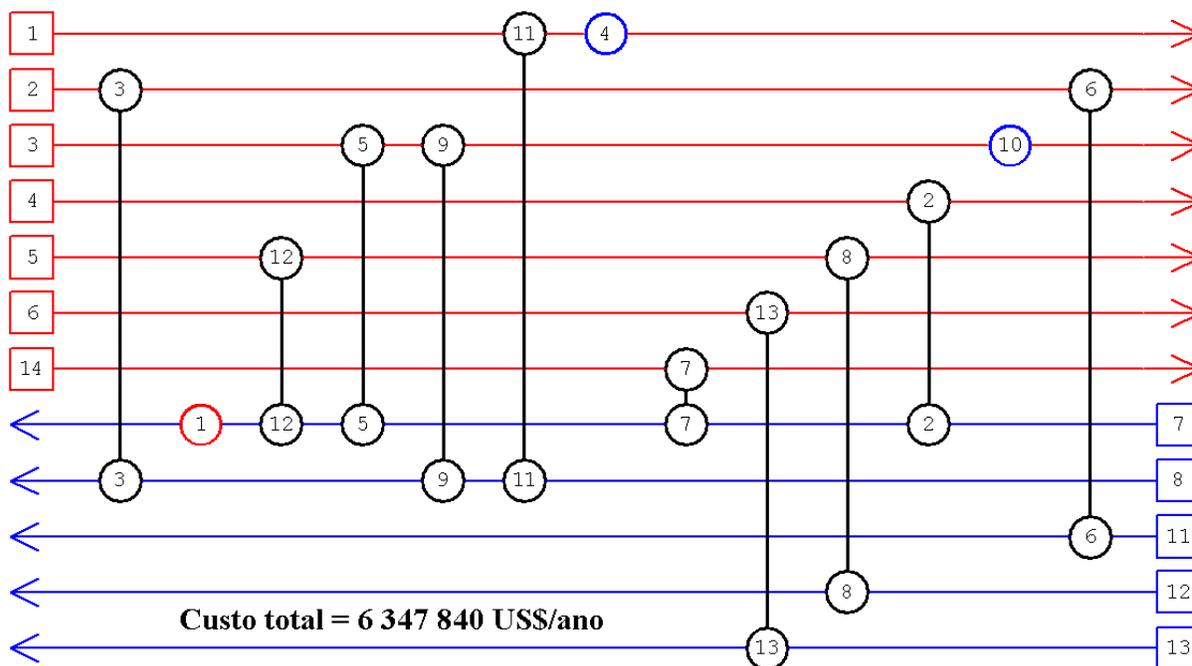


Figura 4.3 - Caso 4.2 - Síntese automatizada – Rede de menor custo

Tabela 4.7 – Detalhes da rede mostrada na Figura 4.3

Trocador	Cascos	Área (m ²)	ΔH (kW)	Trocador	Cascos	Área (m ²)	ΔH (kW)
1 – Aquec.	1	41,12	21 365,0	8	1	93,40	4 158,7
2	2	747,10	16 282,0	9	1	186,82	4 642,6
3	1	53,91	1 475,7	10 – Resfr.	1	98,17	3 798,3
4 – Resfr.	1	32,00	1 816,3	11	1	429,70	7 836,6
5	1	59,35	2 329,2	12	1	334,42	9 448,5
6	1	170,34	2 362,2	13	1	122,85	9 304,0
7	1	422,12	19 073,2				

Num caso mais complexo, como este, mesmo a síntese automatizada exige esforço e competência do projetista, já que seus resultados são dependentes do ponto de partida e do ajuste de uma série de parâmetros, dentre os quais se destaca o ΔT mínimo, todos eles de efeito quase sempre imprevisível sobre o resultado. Isto alonga bastante o trabalho e o torna mais inseguro, pela falta de um objetivo a alcançar (a não ser aqueles fixados pelo PDM).

De qualquer forma, a rede gerada pelo SPRINT para este caso tem a simplicidade como principal virtude, o que, de resto, é uma das características positivas deste programa. Como mencionado, todavia, num projeto real, esta solução teria sido preterida, em favor de outras de maior custo, mas de melhor adequação ao processo.

Quanto ao método manual, foram obtidas duas soluções para este caso, ambas com custo total muito próximo do mínimo previsto. Não houve maior preocupação com relação à adequação das redes ao processo, já que este aspecto também não foi contemplado na síntese automatizada.

A primeira rede manualmente sintetizada seguiu estritamente as regras do PDM e, por isto, apresenta uma corrente dividida em dois ramos. Na segunda, algumas regras são desobedecidas, seletiva e deliberadamente, justamente para evitar o uso de ramos, e talvez por isto, seja ligeiramente mais cara (neste cálculo, o custo da divisão foi desconsiderado e, assim, o resultado real da comparação entre estas duas soluções poderia ser justamente o oposto, já que a diferença dos demais itens é muito pequena).

Esta primeira solução obtida manualmente, já otimizada, é apresentada na Figura 4.4 e detalhada na Tabela 4.8. Assim como a segunda, ela demonstra que a síntese manual também pode obter soluções de custo bem próximo ao ótimo (com a vantagem, aqui não demonstrada, de poder levar em consideração, desde o início da síntese, a adequação das redes ao processo).

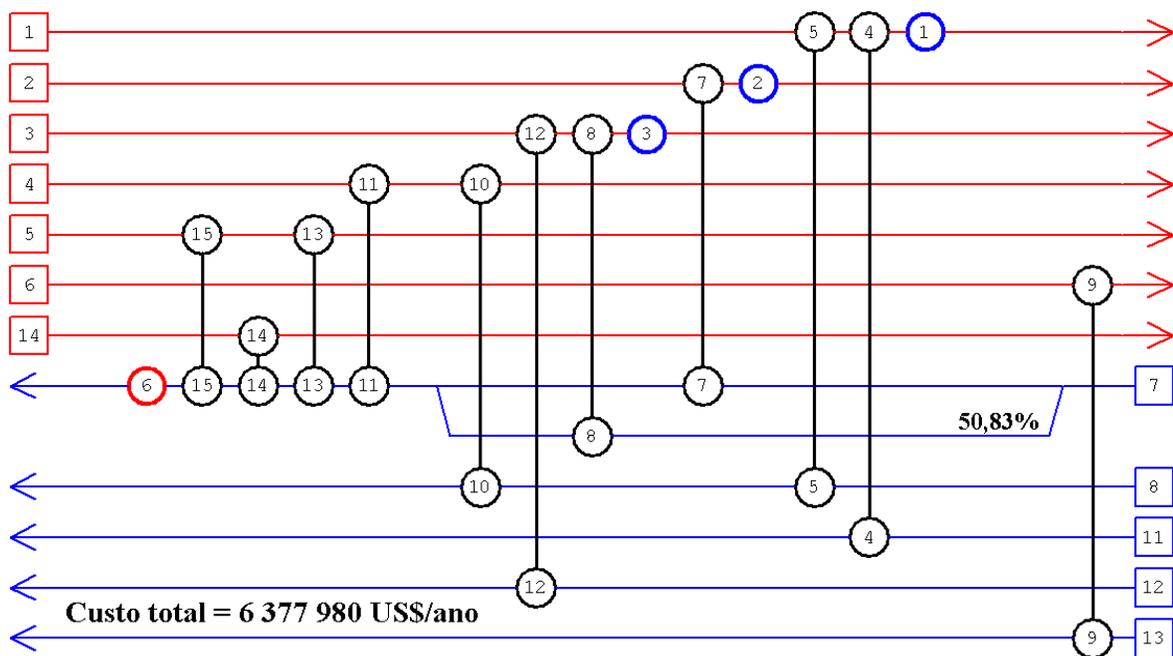


Figura 4.4 - Caso 4.2 - Síntese manual – Solução natural, com ramais

Tabela 4.8 – Detalhes da rede mostrada na Figura 4.4

Trocador	Cascos	Área (m ²)	ΔH (kW)	Trocador	Cascos	Área (m ²)	ΔH (kW)
1 - Resfr.	1	8,09	457,8	9	1	122,85	9 304,0
2 - Resfr.	1	17,85	815,5	10	1	676,71	7 123,2
3 - Resfr.	1	95,78	3 431,9	11	1	394,70	9 158,8
4	1	204,90	2 362,3	12	1	89,66	4 159,1
5	1	248,01	6 832,8	13	1	79,46	4 654,0
6 - Aquec.	1	39,48	20 460,1	14	1	635,16	19 073,2
7	1	147,43	3 022,4	15	1	321,31	8 953,2
8	1	133,34	3 179,0				

Para demonstrar a flexibilidade oferecida pelo PDM, uma segunda rede foi gerada manualmente, com o objetivo de evitar a divisão de correntes em ramais. Generalizando, o PDM permite que praticamente qualquer restrição de processo seja considerada, na maioria das vezes sem afetar significativamente o custo do resultado. Naturalmente, isto exige uma certa experiência, por parte do projetista, bem como um tempo maior dedicado à síntese, e, de qualquer forma, a própria síntese automatizada não escaparia destas dificuldades, num projeto real. Esta segunda solução, sem o uso de ramais e também já otimizada, é mostrada na Figura 4.5 e detalhada na Tabela 4.9. Mesmo apresentando custo ligeiramente superior, ela se situa dentro da faixa que se pode considerar como ótima. A propósito, os custos das redes desta tese são calculados a partir de áreas estimadas e parâmetros simplificados, e por isto exibem distorções que fatalmente devem aparecer também em método numéricos, seja de síntese, seja de otimização, por mais sofisticados que pareçam.

Portanto, a comparação de custos feita nesta fase nunca deve ser vista como algo definitivo. Ao contrário, custos só se tornam mais confiáveis após o detalhamento de cada projeto individual, ocasião em que uma nova otimização pode e deve ser aplicada sobre a rede, provocando eventuais modificações sobre a rede original. Assim, após esta etapa, não é difícil imaginar que, dentro da faixa ótima, a rede originalmente mais cara se torne a mais barata, e vice-versa. E mesmo depois de todo o detalhamento e de uma melhor apropriação de custos, provavelmente sempre ainda restará uma razoável imprecisão neste item. Assim, diferenças marginais de custo quase sempre não têm significado ou são pouco conclusivas.

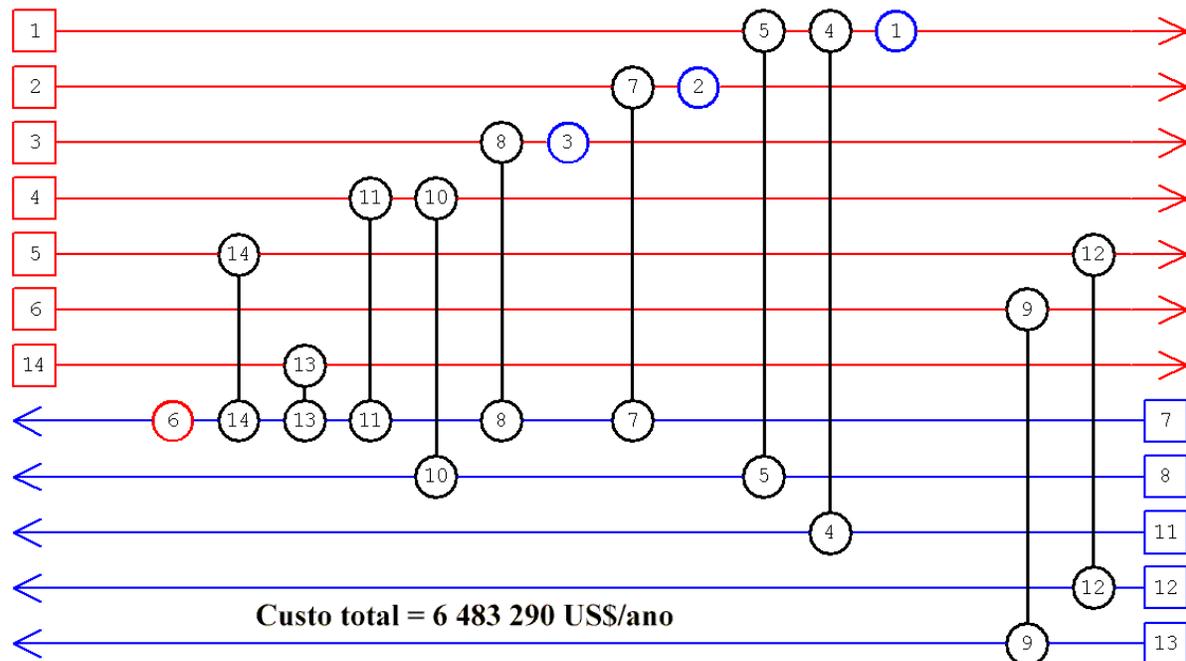


Figura 4.5 - Caso 4.2 - Síntese manual – Sem divisão em ramais

Tabela 4.9 – Detalhes da rede mostrada na Figura 4.5

Trocador	Cascos	Área (m ²)	ΔH (kW)	Trocador	Cascos	Área (m ²)	ΔH (kW)
1 - Resfr.	1	23,02	1 331,2	8	1	179,08	6 942,3
2 - Resfr.	1	15,17	687,0	9	1	122,85	9 304,0
3 - Resfr.	1	101,89	3 827,7	10	1	662,37	7 996,2
4	1	139,41	2 362,0	11	1	583,05	8 285,8
5	1	178,36	5 959,8	12	1	93,41	4 159,0
6 - Aquec.	1	41,55	21 600,9	13	1	512,94	19 073,0
7	1	142,81	3 151,0	14	1	324,40	9 448,0

Em tempo, cabe lembrar que a redistribuição de carga térmica, para otimização do custo anual, é feita normalmente ao final da síntese manual, sem descaracterizá-la como tal, visto que a estrutura original é mantida (a menos da eventual remoção de unidades). No processo, é normal e plenamente aceitável, ainda, que o ΔT_{min} original seja desrespeitado.

4.4 - Estudo numérico - Caso 4.3

O último exemplo utilizado neste estudo é bastante complexo, e também inspirado numa unidade real: a destilação de petróleo, envolvendo também geração de vapor d'água, a partir de água de caldeira não saturada. A vaporização de um líquido saturado a 210 °C é incluída, e a corrente de petróleo é dividida em três, para demarcar os momentos em que ela passa pela dessalgadora e pela torre de “pré-flash”. Os dados deste caso são sumarizados na Tabela 4.10, enquanto os objetivos de projeto, pré-estabelecidos pela “Pinch Technology”, são apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.10 – Dados do Caso 4.3 – Unidade de destilação de petróleo simplificada

Corrente	T_1	T_2	CP	H	Corrente	T_1	T_2	CP	h
4	339,0	304,0	199,37100	1,7247300	1	30,0	150,0	548,6450	0,6477910
5	286,3	206,3	203,52500	1,3444300	2	146,0	175,0	588,7190	1,2339400
6	204,4	135,4	269,68100	1,6223800	3	170,0	350,0	665,9470	1,1455500
7	197,8	42,0	42,32480	1,0292600	15	198,0	214,5	354,0450	3,1912700
8	274,9	42,0	94,50810	1,3467500	18	209,0	210,0	19 771,0000	4,6520000
9	326,6	42,0	37,59520	0,8989990	Utilidades				
10	210,0	80,0	87,16240	0,6443020	Fria	-20,0	-10,0	-	1,1630000
11	173,5	60,0	250,87000	0,3640190	Quente	1 000,0	800,0	-	0,5815000
12	312,4	210,0	465,28000	1,0350700	T_1 e T_2 em °C, CP em kW/°C e h em kW/(°C.m ²) Troc. multipasse - Fator de Ahmad (Xp) máximo = 0,9 Vida útil = 4 anos - Taxa de interesse anual = 8,5% Área máxima por casco = 720 m ² Custo utilidades (fria/quente) = 49 e 152,3 US\$/kW.ano				
13	360,0	230,0	294,39100	0,7954920					
14	230,0	185,0	207,55700	0,4570590					
Parâmetros da equação de custo (trocadores): $a = 0$ $b = 37\ 098$ $exp = 0,558$									

Tabela 4.11 – Caso 4.3 – Ponto ótimo aproximado de projeto e recursos esperados

ΔT_{min}	Consumo de utilidades		A_{mjin} (m ²)	Nº unidades e cascos	Custos anuais (US\$/ano)		
	Quentes	Frias			Utilidades	Área	Total
24 °C	21 172 kW	9 012 kW	13 579	20 / 40	3 666 110	5 843 200	9 509 310

Quase surpreendentemente, o programa SPRINT novamente produz um resultado estruturalmente simples e de custo bastante baixo, mesmo para um caso tão complexo. O tempo despendido em cada síntese também é bastante aceitável, normalmente inferior a 10 minutos, num micro convencional. Como no caso anterior, todavia, várias tentativas foram necessárias para se encontrar as melhores respostas, sempre atuando sobre parâmetros cujo efeito é algo imprevisível, e sem nenhum objetivo pré-fixado, a não ser aqueles estimados pela “Pinch Technology”. Com tudo isto, a síntese automatizada acaba consumindo quase tanto tempo quanto o processo manual e, às vezes, depende de uma ajuda externa, através da adoção de idéias extraídas justamente das sínteses manuais.

Partindo de um ΔT mínimo ótimo de 24 °C, depois reduzido, em função de valores observados nas redes sintetizadas manualmente, a melhor solução automatizada encontrada com o SPRINT foi obtida para um ΔT mínimo de 18 °C. A rede resultante, já otimizada, é mostrada na Figura 4.6 e detalhada na Tabela 4.12.

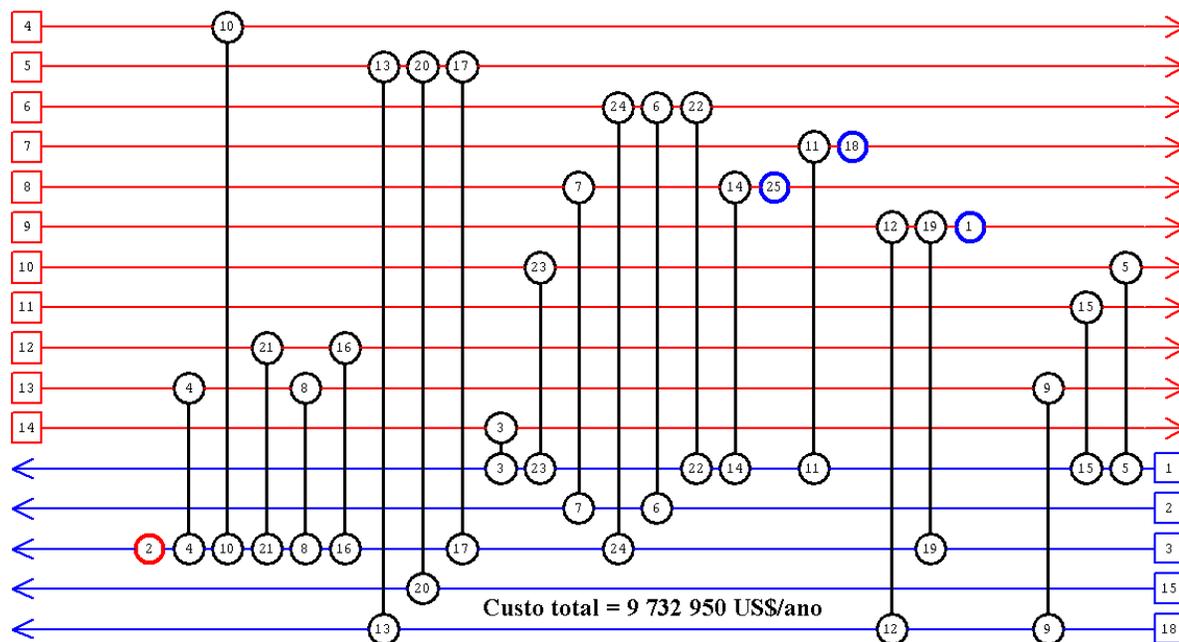


Figura 4.6 - Caso 4.3 - Síntese automatizada – Rede de menor custo

Tabela 4.12 – Detalhes da rede mostrada na Figura 4.6

Trocador	Cascos	Área (m ²)	ΔH (kW)	Trocador	Cascos	Área (m ²)	ΔH (kW)
1 - Resfr.	1	94,58	5 488,7	14	1	319,47	5 413,8
2 - Aquec.	1	128,54	28 005,5	15	4	2 852,86	28 473,7
3	1	553,21	9 338,4	16	3	2 135,14	38 850,6
4	1	709,41	12 041,8	17	1	235,38	5 354,0
5	1	229,71	5 277,3	18 - Resfr.	1	62,42	3 029,0
6	1	505,45	7 852,2	19	1	94,20	1 598,5
7	1	351,98	9 220,0	20	1	160,98	5 841,7
8	2	918,16	15 199,7	21	1	564,57	8 794,1
9	1	447,35	11 027,9	22	1	517,12	7 711,5
10	1	301,33	6 978,0	23	1	500,97	6 053,1
11	1	181,36	3 564,8	24	1	192,34	3 041,9
12	1	86,00	3 612,2	25 - Resfr.	1	131,08	7 376,3
13	1	77,24	5 084,7				

Apesar de simples e barata, a rede gerada na síntese automatizada não exibe uma característica comum nestas unidades, em que o petróleo é usualmente dividido em ramos, para efeito de obter-se uma maior flexibilidade operacional e de facilitar a minimização do consumo de água no resfriamento, substituída pelo próprio petróleo nesta função.

De fato, é bastante difícil interferir tão seletivamente sobre o resultado da síntese automatizada. Em geral, tentativas pouco específicas para forçar ramais no petróleo, por exemplo, podem resultar em uma série de ramais em outras correntes. Se específicas, ao contrário, podem revelar-se rígidas demais. Na síntese manual, ao contrário, tais sugestões podem ser tratadas com menos rigidez e abrangência, e são relativamente fáceis de atender, normalmente sem prejuízo sobre o custo final. A solução obtida através do PDM, mostrada na Figura 4.7 e detalhada na Tabela 4.13 ilustra bastante bem esta afirmação.

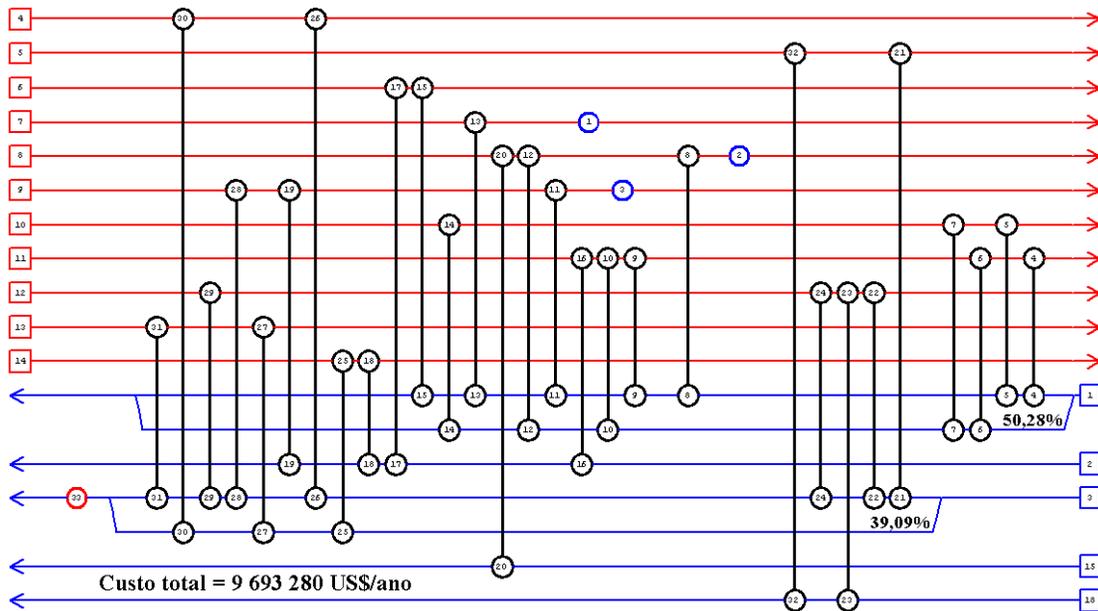


Figura 4.7 - Caso 4.3 - Síntese manual – Ramais deliberadamente utilizados

Tabela 4.13 – Detalhes da rede mostrada na Figura 4.7

Trocador	Cascos	Área (m ²)	ΔH (kW)	Trocador	Cascos	Área (m ²)	ΔH (kW)
1 - Resfr.	1	66,30	3 255,0	18	1	410,85	3 322,8
2 - Resfr.	1	77,69	3 602,4	19	1	144,04	2 593,3
3 - Resfr.	1	59,75	2 652,9	20	2	197,15	5 841,7
4	1	599,34	4 088,8	21	1	216,80	5 526,9
5	1	105,66	1 356,7	22	1	606,01	7 576,6
6	2	892,41	9 737,8	23	1	417,10	9 015,9
7	1	405,47	5 786,8	24	1	679,47	13 607,1
8	1	298,87	5 471,6	25	1	608,80	6 017,2
9	1	446,90	4 652,0	26	1	34,67	1 674,6
10	1	706,49	7 536,5	27	3	2 028,26	24 491,6
11	1	149,80	2 675,3	28	1	164,25	2 778,0
12	1	458,81	7 095,1	29	2	1 439,97	17 445,0
13	1	191,47	3 339,2	30	1	312,72	5 303,4
14	1	394,51	4 187,7	31	2	1 091,93	13 779,3
15	2	883,04	9 909,8	32	1	228,62	10 755,1
16	1	436,40	2 458,6	33 - Aquec.	1	100,30	21 670,7
17	1	460,97	8 698,2				

4.5 - Resumo e análise dos resultados

Como demonstrado pelos exemplos, escolher a síntese manual ou a automatizada pouco afeta o custo final do resultado. Para isto, obviamente, a síntese manual deve contar com a presença de um projetista experiente (o que também se reflete num projeto superior, em termos de adequação da rede ao processo). Na verdade, o ideal é que a síntese manual tenha, ainda, a participação de um especialista no processo. Assim, o especialista indicaria ao projetista as características desejáveis e indesejáveis da rede, e este saberia, então, como incluí-las (ou impedi-las) no resultado final.

Infelizmente, esta colaboração é menos profícua na síntese automatizada, pois a inserção direta das características desejáveis é muito difícil, por mais experiente que seja o projetista ou usuário do programa. Na melhor das hipóteses, pode ser que algumas daquelas virtudes se façam presentes por acaso nas redes sintetizadas automaticamente, ou, com um pouco de sorte, que outras sejam incluídas indiretamente, por tentativas, e meio às cegas.

A síntese manual implica, ainda, numa etapa inicial de análise termodinâmica, que potencialmente agrega uma série de vantagens à rede e ao próprio processo. Dentre estas, destacam-se as avaliações de modificações de processo que possam produzir ganhos e da oportunidade de geração de utilidades (em substituição ao consumo de outras, e, portanto, com a troca de uma despesa por uma receita). Por exemplo, um resfriamento por utilidade, requerido num nível elevado de temperatura, poderia servir para aquecer água de caldeira, ao invés de simplesmente descartar energia, utilizando água de resfriamento. E, novamente, nestas análises, a participação de um especialista no processo seria muito útil.

O alinhamento entre os custos obtidos pelo PDM e SPRINT frente aos objetivos de projeto pré-estabelecidos pela “Pinch Technology” demonstra que estes objetivos são realistas, ao menos em termos de custo. Cabe ressaltar que a similaridade entre os custos obtidos pelos dois métodos se deve, em parte, ao fato de que ambos utilizaram os mesmos parâmetros estimados e cálculos simplificados, na determinação da área requerida pelos trocadores da rede. De qualquer forma, as imprecisões e diferenças que possam aparecer neste aspecto podem também ser convenientemente tratadas, como mencionado, através da otimização final da rede, na etapa de projeto detalhado, ou, se necessário, pela repetição de todo o processo de síntese (estabelecimento de objetivos e síntese), com parâmetros mais bem estimados, conforme as informações obtidas no projeto detalhado.

A síntese automatizada teria a vantagem adicional de poder utilizar maior precisão na determinação da área requerida pelos trocadores da rede, inclusive de forma simultânea, durante a própria síntese. Esta vantagem, todavia, ainda não pode ser plenamente explorada em termos práticos, por limitações relativas à precisão de outros cálculos envolvidos, sejam relacionados a outros elementos da rede, seja nas próprias estimativas de custo. Na verdade, nem o projeto de trocadores individuais é feito hoje de forma totalmente automatizada, pelo risco que isto representaria. Portanto, incorporar esta facilidade ao projeto da rede não seria necessariamente benéfico. De fato, até que haja uma evolução global neste aspecto, não se recomenda uma preocupação exagerada com os custos, nem em termos de precisão, e muito menos como elemento de decisão, quando as diferenças forem marginais. Por outro lado, a síntese manual permite que se considere a adequação da rede ao processo, desde o início da síntese, e sem comprometer os objetivos de projeto, conforme exemplificado neste capítulo.

Sem esta facilidade, o programa SPRINT apresentou, entretanto, resultados muito bons, no que tange à simplicidade estrutural da rede e ao seu custo total, com um dispêndio de tempo normalmente um pouco menor que o da síntese manual. Assim, por extrapolação, a síntese automatizada já poderia ser considerada uma nova ferramenta de projeto, a somar-se aos instrumentos de síntese manual. Para casos que não apresentem maiores restrições de processo ou estratégias especiais de projeto, ela poderia até ser, eventualmente, e com os devidos cuidados, a única ferramenta aplicada. Do contrário, seu uso estaria normalmente associado à síntese manual, como ferramenta adicional. Uma sugestão, por exemplo, seria sua aplicação no estágio final da síntese, quando as principais condições de projeto podem já estar atendidas. Com efeito, esta etapa pode ter poucas restrições de processo, mas exige paciência, e o uso da síntese automatizada pode adiantar a solução do quebra-cabeça, sem comprometer o custo e as demais virtudes da rede. Além disto, soluções automatizadas podem servir, no início do projeto, para balizamento e geração de idéias estruturais. Por outro lado, ela ainda deve ser vista, também, como uma arma um tanto ou quanto perigosa, nas mãos de iniciantes, que poderiam simplesmente adotar suas respostas como definitivas e desistir de sintetizar manualmente e de investigar outras soluções. Além disto, o exclusivo uso destas ferramentas pode levar seus usuários a se distanciarem da análise termodinâmica prévia do processo, em que se costuma obter ganhos significativos, inclusive econômicos. Tudo isto, é claro, até que esteja disponível a síntese automatizada perfeita, capaz de gerar redes de custo mínimo, absolutamente precisas e totalmente adequadas ao processo.

Capítulo 5

Redes existentes: o método proposto e suas vantagens

No contexto da “Pinch Technology”, o método mais tradicional para a otimização manual de redes existentes, é apresentado em detalhe no item 3.7. Baseado na tese de Tjoe (1986), sua longevidade infelizmente não está associada a um grande sucesso. Ao contrário, a linha termodinâmica (e manual) de ação, que este método representa, está longe de contar com aprovação quase unânime observada no projeto de redes novas (“grass-root design”). Além disto, por sua própria formulação, este método específico não cobre todos os tipos de projetos envolvendo redes existentes.

Portanto, se este método ainda pode ser considerado como a melhor solução dentro do contexto termodinâmico e manual, isto se deve principalmente ao fato de que esta linha de pesquisa vem perdendo espaço, desde os anos 90, em favor dos métodos automatizados. Um extenso levantamento bibliográfico elaborado por Furman & Sahinidis (2002) sustenta esta conclusão e mostra ainda que, mesmo na Universidade de Manchester, onde floresceu a “Pinch Technology”, o trabalho subsequente mais significativo nesta área já não é mais exclusivamente voltado à síntese manual da rede. De fato, o chamado “Network Pinch”, desenvolvido a partir da tese de Asante (1996) e descrito no livro de Smith (2005), pode ser considerado um método automatizado assistido, em que se conjuga um certo automatismo (no cálculo e identificação de oportunidades) com as decisões tomadas por um especialista. Em todo caso, mesmo tendo obtido relativo sucesso, este método também está longe de aprovação e adoção unânimes.

Por outro lado, e apesar de ter tido maior ênfase nestes últimos 15 anos, a pesquisa dedicada aos métodos automatizados também ainda não deu origem a produtos comerciais de sucesso amplo e irrestrito. Portanto, e considerando ainda os resultados positivos e as demais vantagens da síntese manual de redes novas através da “Pinch Technology”, como demonstrado no Capítulo 4, parece haver razoável motivação para que esta metodologia seja estendida também à reestruturação de redes existentes.

Este é justamente o objetivo desta tese: propor um novo método dedicado a redes existentes, dentro da linha termodinâmica e manual, aproveitando ao máximo os elementos que fizeram o sucesso da “Pinch Technology” na síntese de redes novas, para reproduzi-lo também neste novo contexto, e expandir, ao mesmo tempo, a aplicação bastante restrita do citado método tradicional.

5.1 - O método proposto

Em função das estratégias de cada método, as diferenças entre eles aparecem já no estabelecimento de objetivos, a que, aliás, de um ponto de vista rígido, ambos se dedicam, prioritariamente (a estratégia de síntese, propriamente dita, é mais ou menos decorrente da filosofia de “targeting” adotada, e também são diferentes, por este motivo).

Assim, no método tradicional, os objetivos de projeto são fixados para obter-se um certo tempo de retorno do investimento, e isto limita sua aplicação aos projetos em que este parâmetro pode ser calculado (o que nem sempre acontece). Por sua vez, o método proposto estabelece estes objetivos, em princípio, pelo mesmo processo usado para redes novas, mas levando em conta, naturalmente, a reutilização dos trocadores existentes.

Nesta reutilização, todavia, é de se esperar que os trocadores existentes sejam ora maiores, ora menores, que o idealmente requerido em seus novos serviços. Noutros termos, o aproveitamento da área existente introduz uma ineficiência, em relação a uma rede nova. Por isto, o método proposto prevê uma eficiência de reutilização da área existente (E_r), que define uma área efetiva (A_e) correspondente à área original (A_o), conforme a Equação (5.1). Este fator normalmente se situa na faixa de 80 a 90%, mas isto não corresponde a limites ou a uma sugestão genérica, já que seu valor pode variar bastante, conforme o caso.

$$\text{Área existente efetiva} = A_e = E_r A_o \quad (5.1)$$

Assim, para cada ΔT_{min} , ou seja, para cada nível de consumo de utilidades, a área adicional requerida (A_{add}) pode ser calculada por diferença, em relação à área mínima da rede nova correspondente (A_{min}), conforme a Equação (5.2). Em termos simples, a área adicional requerida complementa a área existente efetiva:

$$\text{Área adicional requerida} = A_{add} = A_{min} - A_e \quad (5.2)$$

Ainda sobre a eficiência de reutilização da área existente, é preciso ressaltar que ela depende não apenas dos equipamentos existentes e de seu estado, mas, principalmente, de sua adaptação às novas condições de operação. Assim, mesmo que todos os trocadores estejam em bom estado e perfeitamente adequados às suas atuais funções, pode ser que sua eficiência de reutilização seja muito baixa, se, por exemplo, seu material ou condições de projeto forem inadequados à nova situação. Da mesma forma, o tipo de construção de cada trocador pode inviabilizar sua reutilização, baixando esta eficiência, para o conjunto.

Por outro lado, o custo total de reutilização, ou custo da área original (C_o), é algo independente desta eficiência e deve ser considerado, quando necessário. Isto permite que se leve em conta os serviços normais de manutenção requeridos pelos trocadores existentes e os eventuais investimentos requeridos pela readaptação dos trocadores, inclusive aqueles advindos da substituição parcial do material empregado. Para efeito da reutilização de cada unidade, durante o processo de remontagem da rede, o custo de reutilização pode e deve ser individualizado, conforme as condições e facilidade de adaptação de cada trocador. Nesta etapa inicial de estabelecimento de objetivos, todavia, apenas o custo total da área original pode ser considerado.

Quanto à área adicional, seu custo instalado pode ser estimado. Para isto, é preciso conhecer o número de cascos adicionais requeridos (N_{add}) que, por sua vez, depende da área típica dos cascos adicionais (A_s). Este número é estimado através da Equação (5.3), de onde somente a parte inteira do resultado deve ser tomada. Com certo otimismo, pode-se assumir que esta área típica seja igual à área máxima por casco (normalmente fixada como critério, em projetos reais), ou, em última análise, que ela apenas reproduza a área média por casco, conforme observada na rede existente.

$$\text{Número de cascos adicionais (inteiro)} = N_{add} = (A_{add} / A_s) + 1 \quad (5.3)$$

De posse desta informação, o custo da área adicional (C_{add}) pode ser calculado através da Equação (5.4), em que o custo médio dos novos cascos (C_{ns}) representa o custo de um casco com área igual à área média dos cascos (A_{add} / N_{add}).

$$\text{Custo da área adicional} = C_{add} = N_{add} C_{ns} \quad (5.4)$$

Finalmente, é possível determinar o custo total referente à área (C_a), simplesmente somando o investimento correspondente à área adicional aos custos de reutilização da rede original, conforme representado na Equação (5.5):

$$\text{Custo da área (total)} = C_a = C_{add} + C_o \quad (5.5)$$

A primeira vantagem deste método é a possibilidade de direcionar o projeto para o custo ótimo (anual) da rede, a exemplo do que se faz no projeto de redes novas, ao invés de analisar exclusivamente o tempo de retorno do investimento. Para isto, o custo da área deve ser convertido num custo anual, de acordo com os critérios financeiros estabelecidos para o projeto específico (vida útil, taxa de juros, etc.).

Assim, como no projeto de uma rede nova, mas considerando o reaproveitamento de trocadores, o custo anual da rede pode ser calculado em função do nível de recuperação de energia, e isto permite encontrar o ponto ideal de projeto, em termos de seu custo anual. Sempre imitando o procedimento utilizado para redes novas, o comportamento dos custos pode ser representado conforme a Figura 5.1, já que cada ΔT_{min} corresponde a um consumo definido de utilidades e a um investimento em trocadores (seja em área adicional, seja pelo próprio reaproveitamento dos equipamentos existentes).

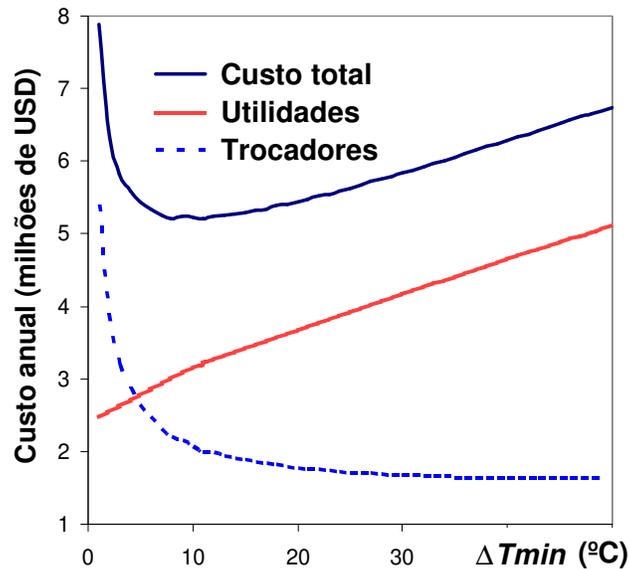


Figura 5.1 – Método proposto - Custos anuais de reaproveitamento

Quando desejável e admissível, o método proposto pode ser aplicado com outros critérios que não o custo ótimo anual. Por exemplo, sempre é possível estabelecer um limite de investimento ou um consumo máximo de utilidades, e usar estas condições como critério adicional ou exclusivo de projeto. Finalmente, pode-se tomar como critério o próprio tempo de retorno, que serve de base exclusiva ao método tradicional, se a rede existente, com seus aquecedores e resfriadores, for capaz de atender às novas condições de operação e, assim, puder constituir-se numa base de comparação. Se, ao contrário, a rede exigir investimentos mínimos para operar nas novas condições, o tempo de retorno só poderia ser calculado se existissem técnicas para justamente estabelecer este investimento mínimo. Como elas não existem, o método proposto teria que ser aplicado com outros critérios, nestes casos, mas o método tradicional, em contrapartida, simplesmente não poderia ser aplicado. Acontece que estes casos são freqüentes, e isto amplia sobremaneira a superioridade do método proposto, cuja aplicação é sempre possível, inclusive sob o critério mais abrangente: o custo anual.

Como mencionado, o método proposto é basicamente dedicado ao estabelecimento de objetivos prévios de projeto, que geralmente são mais ambiciosos que os sugeridos pelo método tradicional, e ainda assim, bastante realistas, conforme demonstrado e discutido no restante deste capítulo.

Quanto ao processo de montagem da rede, o método proposto apenas se aproveita das regras e ferramentas que fizeram o sucesso da “Pinch Technology”, no âmbito de redes novas, e, aliás, esta foi uma das suas principais motivações. E, com efeito, este alinhamento traz uma série enorme de vantagens, entre elas a possibilidade de aplicar técnicas auxiliares desenvolvidos para redes novas, como, por exemplo, as sugestões de Hall et al. (1990) para casos que envolvem trocadores com equações de custo diferentes, por conta de materiais ou tipos de construção diferentes.

Outra técnica muito interessante que pode ser mantida através do método proposto é a chamada análise do problema remanescente, que mesmo sem fornecer sugestões diretas para a montagem da rede, reforça ou desaconselha cada decisão tomada, de acordo com seu impacto sobre o custo final. Para determinar este impacto, em qualquer estágio do processo, é preciso prever o custo mínimo requerido para completar a solução do problema original, ou seja, o custo previsto para resolver o problema remanescente. Somando-se este custo aos equipamentos já inseridos, pode-se monitorar, com razoável precisão, o custo final da rede. Além disto, esta técnica é absolutamente quantitativa e explícita em relação aos tipos de penalidade decorrentes (consumo de utilidades, área e número de unidades, etc.). Assim, ao contrário da estratégia de remontagem preconizada ou associada ao método tradicional, a própria reutilização dos trocadores existentes estará sujeita a uma monitoração a respeito de sua eficiência.

No método tradicional, a remontagem é feita a partir da rede original, depois que dela sejam removidos os trocadores que violam o ΔT_{min} ótimo (ou correspondente ao tempo de retorno pré-estabelecido), e outras regras básicas da “Pinch Technology”. Contudo, não se verifica a eficiência dos demais trocadores em sua nova função. Logo, não se garante a eficiência dos trocadores mantidos, o que pode comprometer o resultado. Ao contrário, no método proposto, se assume uma ineficiência média de reutilização, mas cada vez que um trocador existente é reutilizado, a eficiência do conjunto é monitorada, com a avaliação de eventuais penalidades. Portanto, durante todo o processo, os desvios podem ser observados e corrigidos a tempo.

De qualquer maneira, independente do método escolhido, a remontagem da rede, em casos reais e complexos, tende a ser sempre mais complicada que a síntese da rede nova correspondente. Com o método proposto, todavia, esta diferença é minimizada pelo arsenal de ferramentas disponíveis para a síntese de redes novas, pois a remontagem é feita como se assim fosse. Naturalmente, neste processo, procura-se sintetizar uma rede com a maior similaridade possível com a rede original, não somente para evitar mudanças de “lay-out”, como também para evitar que os trocadores existentes sejam reutilizados em serviços ou condições muito diferentes de sua aplicação original, o que exigiria cálculos adicionais e, eventualmente, investimentos para sua readaptação.

Em todo caso, mesmo com as limitações impostas pelo reaproveitamento de uma rede existente, a síntese feita desta forma não apenas é exeqüível, como ainda pode atender satisfatoriamente, e desde os primeiros passos, à adequação da rede ao processo, a exemplo do que ocorre numa síntese nova ordinária. Comparada à síntese de redes novas, um pouco mais de paciência, criatividade e experiência costumam ser requeridas, mas os resultados tendem a ser igualmente confiáveis e compensadores (mas sempre numa ótica de menores expectativas, limitadas pela maior dificuldade intrínseca do problema).

Finalmente, o resultado da síntese manual pode ser otimizada em computador, se os objetivos de projeto forem estabelecidos em função do custo ótimo anual, ao contrário do método tradicional, cuja base é algo incompatível com uma otimização do custo anual.

Os estudos de caso a seguir procuram demonstrar estas características e vantagens, embora uma comprovação completa e definitiva de algumas delas seja quase impossível.

5.2 - Estudo comparativo - Caso 5.1

Para que a demonstração aqui pretendida tenha maior alcance e credibilidade, os exemplos usados neste capítulo são inspirados numa unidade industrial bastante complexa: a destilação de petróleo. Na verdade, um único caso base é utilizado, com variações tais que dão origem a dois outros exemplos. De acordo com uma prática comum nestas unidades de processo, o petróleo é representado por três correntes complementares, que se dividem nas temperaturas correspondentes à entrada e saída da dessalgadora e da torre de “pré-flash”, e, por simplicidade, nenhuma outra corrente fria é considerada. Os dados e os parâmetros de projeto estão resumidos na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Dados do Caso 5.1 – Unidade de destilação de petróleo simplificada

Corrente	T_1	T_2	CP	h
1	250	45	70	0,95
2	300	45	60	0,70
3	175	45	80	0,75
4	250	140	200	0,75
5	135	75	425	0,95
6	120	80	175	0,60
7	300	120	465	0,80
8	340	240	310	0,30
9	240	100	160	0,20

Corrente	T_1	T_2	CP	h
10	265	350	745	0,70
11	30	160	695	0,50
12	155	245	900	0,70

Utilidades				
Água	15	45	-	3,00
Forno	1 000	800	-	-

T_1 e T_2 em °C, CP em kW/°C e h em kW/(°C.m²)
 Troc. multipasse - Fator de Ahmad (X_p) máximo = 0,9
 Vida útil = 10 anos - Taxa de interesse anual = 15%
 Área máxima por casco = 750 m²
 Custo utilidades (fria/quente) = 49 e 152,3 U\$/kW.ano

Parâmetros da equação de custo (trocadores):				
$a = 0$	$b = 18\ 000$	$exp = 0,56$		

Como nos dois últimos exemplos do Capítulo 4, os estudos de caso deste capítulo assumem que todos os serviços, com exceção dos fornos, são realizados por trocadores tipo Casco & Tubos, em arranjo multipasse. Também como naqueles casos, o parâmetro fixado para seleção do número mínimo de passes no casco (ou número de cascos em série), foi o chamado parâmetro- X , ou X_p , como descrito por Ahmad et al. (1988). Da mesma forma, foi estabelecida uma área máxima por casco, para evitar equipamentos de tamanho exagerado e as conseqüentes dificuldades de manutenção ou transporte. Finalmente, para os trocadores novos, os parâmetros de custo de cada casco devem ser aplicados à mesma Equação (4.1), usada em todos os demais exemplos desta tese. Para evitar complicações exageradas, foi admitido um único subtipo de trocador e um só material de construção, representado por um único conjunto de parâmetros de custo (a , b e exp). A rede existente, a ser reaproveitada também nos casos subseqüentes, é mostrada na Figura 5.2 e detalhada na Tabela 5.2.

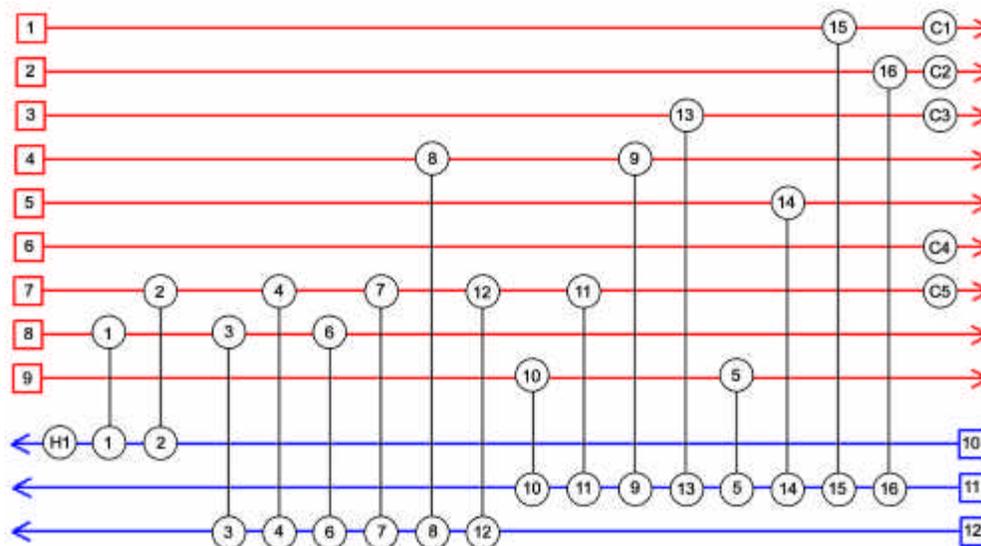


Figura 5.2 – Caso 5.1 - Rede existente

Tabela 5.2 – Detalhes da rede mostrada na Figura 5.2

Unid.	Cascos	Área (m ²)	ΔH (kW)	Unid.	Cascos	Área (m ²)	ΔH (kW)
1	1P 2S	1 407,62	10 843,6	12	2P 1S	1 500,00	14 421,4
2	1P 2S	1 293,15	8 971,8	13	2P 1S	335,20	3 811,4
3	2P 1S	1 362,61	12 438,7	14	2P 2S	2 518,20	25 500,0
4	2P 1S	1 434,43	18 747,8	15	1P 1S	170,25	7 845,8
5	2P 2S	2 744,21	12 123,3	16	1P 1S	121,47	7 086,6
6	2P 1S	814,63	7 717,7	C1	1P 1S	200,00	6 504,2
7	2P 1S	1 499,02	15 014,5	C2	1P 1S	252,00	8 213,4
8	2P 1S	1 198,88	12 659,9	C3	1P 1S	262,00	6 588,6
9	2P 1S	762,79	9 340,1	C4	1P 1S	209,22	7 000,0
10	2P 1S	1 500,00	10 276,7	C5	1P 1S	189,42	12 178,5
11	2P 2S	1 838,95	14 366,1	H1	1	Forno	43 509,7

Uma característica marcante da rede existente é o fato de atender exatamente aos requisitos energéticos de todas as correntes, sem qualquer déficit ou superávit. Obviamente, esta não é uma condição comum, em casos reais, mas foi utilizada na presente comparação exatamente por não favorecer, ou mesmo desfavorecer, o método proposto.

Na Tabela 5.2, o item “Cascos” corresponde à representação tradicional do arranjo de cascos nos trocadores tipo Casco & Tubos, em que o número em paralelo (P) representa o número de ramais iguais em que se subdividem ambas as correntes, enquanto o número em série (S) equivale ao número de cascos em série em cada um daqueles ramais. Portanto, o número total de cascos em cada unidade (ou trocador, ou serviço) é igual à multiplicação daqueles números. Além disto, múltiplos cascos de uma única unidade original são sempre idênticos, mas poderão ser reutilizados de forma separada, ou seja, em mais de um serviço. As áreas mostradas correspondem a todos os cascos da unidade, e a carga térmica do forno será assumida, no reaproveitamento, como sua capacidade limite. Os custos de reutilização foram desprezados, para efeito de simplicidade, embora seja muito simples considerá-los, em ambos os métodos. Em todo caso, com já mencionado, espera-se que a remontagem da rede contemple ao máximo a similaridade com a rede original, para minimizar os custos de realocação de equipamentos e permitir que o reaproveitamento seja feito de forma natural, sem o recurso a cálculos adicionais que, de outra maneira, seriam necessários para validar o desempenho térmico e as perdas de carga de cada trocador em sua nova função.

Aplicando-se a “Pinch Technology” a este caso, a área mínima (A_{min}) e o custo de utilidades para uma rede nova podem ser estimados para cada ΔT_{min} , conforme mostrado na Tabela 5.3, para a faixa de ΔT_{min} relevante, a partir de 25 °C (cujo consumo de utilidades é praticamente igual ao observado na rede existente).

Tabela 5.3 – Objetivos da síntese (rede nova) e do “retrofit” (método tradicional)

ΔT_{min}	Custo util. (US\$/ano)	Área total requerida (m ²)			ΔT_{min}	Custo util. (US\$/ano)	Área total requerida (m ²)		
		A _{min}	α incr.	α cte.			A _{min}	α incr.	α cte.
11 °C	6 505 226	26 538	31 178	33 792	19 °C	7 703 865	20 266	24 906	25 806
12 °C	6 655 056	25 093	29 733	31 953	20 °C	7 855 466	19 565	24 205	24 913
13 °C	6 804 886	23 908	28 548	30 443	21 °C	8 005 296	18 943	23 582	24 120
14 °C	6 954 716	22 899	27 539	29 158	22 °C	8 155 126	18 382	23 022	23 407
15 °C	7 104 546	22 917	27 557	29 181	23 °C	8 305 526	17 872	22 512	22 758
16 °C	7 254 376	23 174	27 814	29 509	24 °C	8 455 356	17 405	22 045	22 163
17 °C	7 404 205	22 015	26 655	28 033	25 °C	8 611 684	16 974	21 614	21 614
18 °C	7 554 035	21 070	25 710	26 829					

Na mesma tabela, e também para cada ΔT_{min} , aparece a previsão da área que a rede teria ao final do projeto, segundo o método tradicional (de “retrofit”) e conforme o caminho escolhido (α -incremental ou α -constante), com base na área da rede existente (21 614 m²). De acordo com a teoria exposta no item 3.7, a área prevista com α -constante simplesmente manteria a eficiência da área (observada no ponto atual de operação, com $\Delta T_{min} = 25$ °C) e, por isto, as áreas daquela coluna guardam uma relação fixa com as áreas mínimas das redes novas correspondentes. Na coluna do α -incremental, a área total prevista é inferior, porque apenas a área existente manteria a eficiência original, enquanto a área adicional seria 100% eficiente. Para observação visual, a Tabela 5.3 é representada na Figura 5.3.

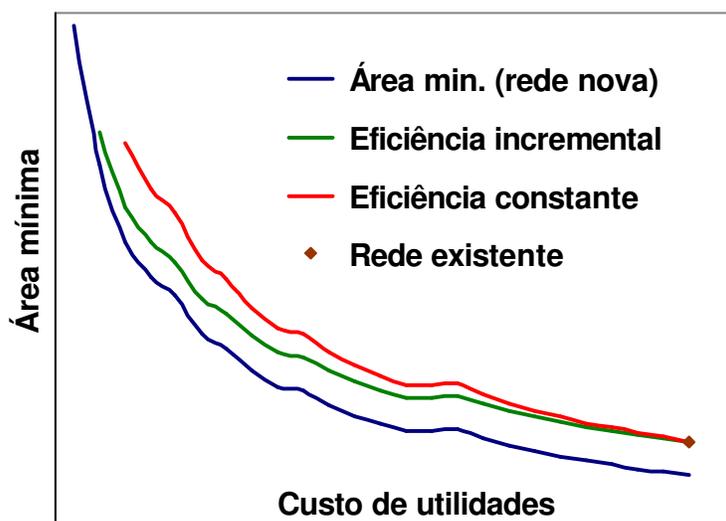


Figura 5.3 – Método tradicional – Caminhos do “retrofit”

Neste exemplo específico, a eficiência original já é relativamente alta (78,5%) e, por isto, segundo as práticas correntes, o caminho do α -incremental seria pouco indicado, devendo-se preferir o caminho mais conservador, do α -constante, mostrado na Tabela 5.4 e analisado financeiramente na Figura 5.4, com linhas indicativas do tempo de retorno (TR).

Tabela 5.4 – Caso 5.1 – Método tradicional – Previsão financeira (α -constante)

ΔT_{\min}	A_{add} (m ²)	N_{add}	Custos (10 ⁶ US\$)		TR (anos)	ΔT_{\min}	A_{add} (m ²)	N_{add}	Custos (10 ⁶ US\$)		TR (anos)
			Invest.	Econ.					Invest.	Econ.	
11 °C	12 178	17	12,151	2,106	5,77	18 °C	5 215	7	5,114	1,058	4,84
12 °C	10 339	14	10,178	1,957	5,20	19 °C	4 192	6	4,229	0,908	4,66
13 °C	8 829	12	8,706	1,807	4,82	20 °C	3 299	5	3,413	0,756	4,51
14 °C	7 544	11	7,673	1,657	4,63	21 °C	2 506	4	2,652	0,606	4,37
15 °C	7 567	11	7,686	1,507	5,10	22 °C	1 793	3	1,937	0,457	4,24
16 °C	7 895	11	7,871	1,357	5,80	23 °C	1 144	2	1,260	0,306	4,12
17 °C	6 419	9	6,417	1,207	5,31	24 °C	549	1	0,616	0,156	3,94

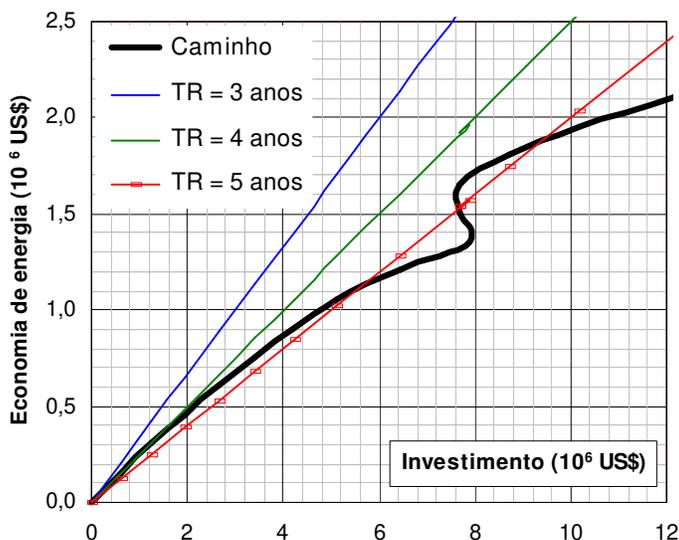


Figura 5.4 – Método tradicional (α -constante) – Tempo de retorno (TR)

Na estimativa do investimento, o número de cascos adicionais foi minimizado, por assumir que sua área média seria a maior possível, só limitada pela área máxima por casco. Embora aparentemente otimista, esta hipótese revela-se aceitável (para efeito da estimativa de custos), e será aplicada também no método proposto, não só por conta do realismo que a credencia para uso prático irrestrito, mas também por tornar nossa comparação dos métodos mais imparcial.

De qualquer forma, o caminho caracterizado como α -constante, embora preferível, neste caso, indicaria um tempo de retorno quase sempre muito elevado, mesmo na região próxima à origem, onde as previsões de projeto seriam menos confiáveis, por envolverem pequenos investimentos (e, possivelmente, muitas modificações estruturais, cujo custo não é facilmente previsto e, por isto, costuma ser desprezado nestas análises). De fato, o melhor ponto de projeto sugerido por este método ainda teria um tempo de retorno de 4,63 anos (ou um pouco menor, como talvez se pudesse extrair da Figura 5.4).

Com tais resultados (e um tempo de retorno algo imediatista), o método tradicional talvez nem mesmo encorajasse a continuação deste projeto. O método proposto, entretanto, nos apresentaria um quadro bem mais otimista. Assumindo que a eficiência de reutilização da área (E_r) seja de 80%, por exemplo, a rede existente ofereceria uma área efetiva (A_e) de 17 291,20 m², que deduzida da área mínima requerida pela rede nova correspondente a cada ΔT_{min} , conforme a Tabela 5.3, dá origem ao um novo caminho de “retrofit”, sumarizado na Tabela 5.5. Em função dos menores investimentos observados neste exemplo, que emergem da forma diferente com que é tratada a eficiência da área nos dois métodos, o novo caminho proposto exhibe, para cada ΔT_{min} , um tempo de retorno (TR) sempre menor que o previsto no método tradicional.

Tabela 5.5 – Caso 5.1 – Método proposto – Custo anual e tempo de retorno (TR)

ΔT_{min}	A_{add} (m ²)	N_{add}	Custo total (US\$/ano)	TR (anos)	ΔT_{min}	A_{add} (m ²)	N_{add}	Custo total (US\$/ano)	TR (anos)
11 °C	9 247	13	8 349 263	4,39	18 °C	3 779	6	8 349 044	3,77
12 °C	7 802	11	8 212 919	4,00	19 °C	2 975	4	8 285 620	3,22
13 °C	6 617	9	8 105 351	3,61	20 °C	2 274	4	8 355 945	3,32
14 °C	5 608	8	8 080 239	3,41	21 °C	1 651	3	8 373 928	3,05
15 °C	5 626	8	8 232 084	3,75	22 °C	1 091	2	8 399 626	2,69
16 °C	5 883	8	8 410 537	4,28	23 °C	581	1	8 432 209	2,08
17 °C	4 724	7	8 368 327	4,01	24 °C	114	1	8 506 258	1,63

Numa faixa mais ampla, o custo total do “retrofit” é apresentado em duas escalas na Figura 5.5, em que a primeira sugere que o custo ótimo é pouco sensível ao ΔT_{min} , acima de 10 °C, enquanto a outra dá justamente a impressão oposta (e na verdade, apesar da maior nitidez da segunda escala, a variação não é realmente muito significativa, em torno de 5%).

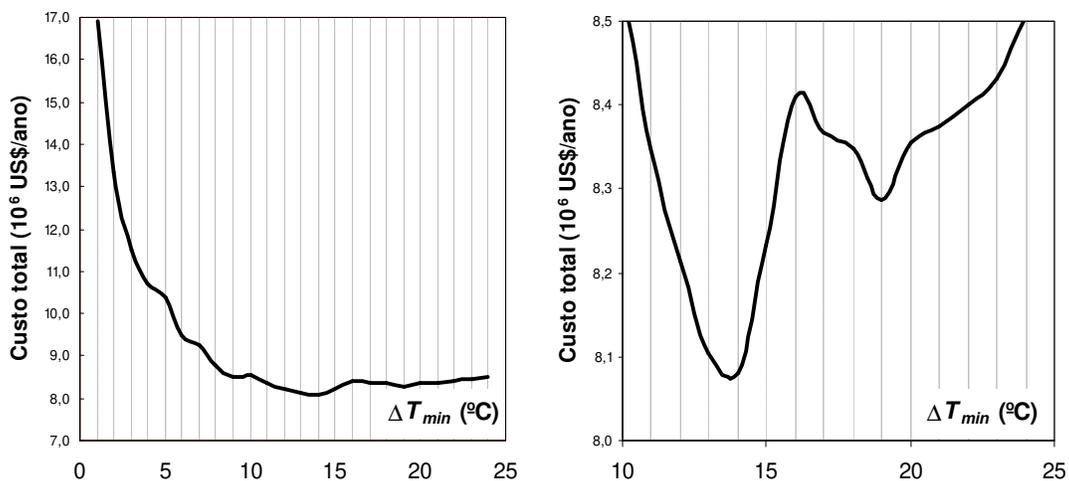


Figura 5.5 – Método proposto – Caso 5.1 – O custo anual em duas escalas diferentes

Nesta aplicação específica, o ΔT_{min} correspondente ao custo ótimo anual coincide com aquele que implica no menor tempo de retorno previsto (sempre desprezando a região de baixíssimo investimento, e pequena economia de energia, onde as previsões são menos confiáveis). Esta coincidência se estende, ainda, ao menor tempo de retorno obtido com o próprio método tradicional. De fato, todos indicariam o mesmo ΔT_{min} aproximado de 14 °C (ou o consumo de energia correspondente), mas com figuras bem diferentes: a área prevista para a rede, ao final do projeto seria de 5 608 m², de acordo com o método proposto, contra 7 544 m² do método tradicional, determinando tempos de retorno bem diferentes (3,41 anos contra 4,63 anos, respectivamente).

Estas coincidências são realmente fortuitas, mas o método proposto normalmente propõe objetivos mais ambiciosos que o método tradicional, por sua própria formulação, a menos que o método tradicional se utilize do caminho do α -incremental, o que nem sempre é recomendado, como neste caso, pelos seus próprios autores.

Outra vantagem interessante do critério do custo anual (sobre o tempo de retorno) pode ser observada neste exemplo (e em muitos outros, embora menos genérica, e por isto mesmo, menos destacada). Com efeito, o comportamento pouco sensível do custo anual na faixa vizinha ao ponto ótimo é relativamente comum e permite concluir que a escolha deste ponto é mais ou menos flexível. Numa rede nova, isto apenas deslocaria o projeto para uma condição de maior ou menor consumo de utilidades, com as conseqüentes diferenças sobre o impacto ambiental e o investimento. Como, entretanto, o custo combinado anual sofreria pouca variação, a escolha do ponto ótimo transforma-se numa decisão menos econômica, e mais política ou estratégica. Nestes casos, um investimento maior resultaria numa unidade energeticamente superior e mais lucrativa, mas com o tempo de retorno maior. O contrário também seria possível, e teria pouco efeito sobre o custo anual, mas o tempo de retorno do investimento seria menor e a unidade, menos eficiente (e menos lucrativa). Portanto, não é incomum que o ponto ótimo de projeto de uma rede nova seja relativamente flexível, numa certa faixa, e felizmente esta vantagem, talvez de forma menos ampla, pode ser estendida a projetos envolvendo redes existentes, através do método proposto. No nosso caso, para um ΔT_{min} de 11 °C, o método proposto prevê um tempo de retorno de 4,39 anos, com aumento de 65% na área adicional. O custo anual, todavia, subiria apenas 3,3 %, o que pode ser visto como aceitável, em termos estratégicos. O método tradicional, entretanto, quase certamente recusaria esta ousadia, pois o tempo de retorno saltaria de 4,63 para 5,77 anos.

Para demonstrar que os objetivos de projeto fixados através do método proposto são realistas, a rede existente foi remontada com base num ΔT_{min} de 13,5 °C (o ótimo mais exato). Conforme sugerido no método, a montagem foi feita como se fosse uma rede nova, mas, naturalmente, reutilizando a área existente e preservando ao máximo o “lay-out” e os serviços originais. Já otimizada em computador, a rede obtida é apresentada na Figura 5.6 (onde são indicadas apenas as divisões de fluxo não uniformes) e detalhada na Tabela 5.6.

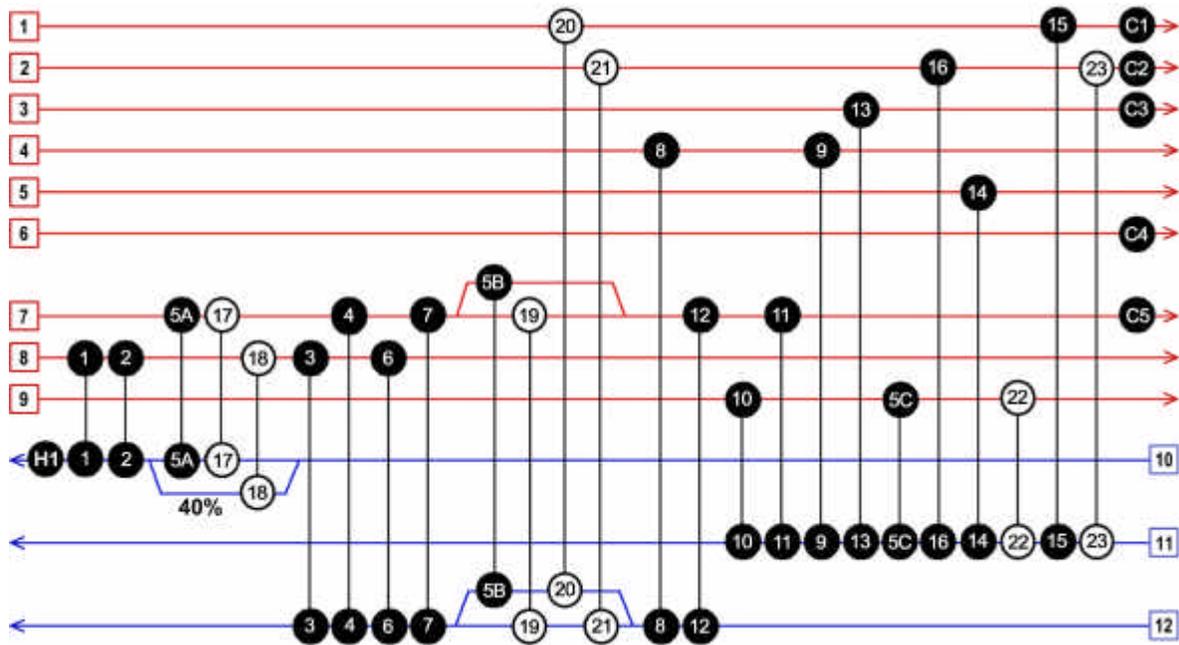


Figura 5.6 – Caso 5.1 – Método proposto - Rede otimizada

Tabela 5.6 – Detalhes da rede mostrada na Figura 5.6

Unid.	Cascos	Área (m ²)	ΔH (kW)	Unid.	Cascos	Área (m ²)	ΔH (kW)
1	1P 2S	1 407,62	8 130,0	15	1P 1S	170,25	5 996,7
2	1P 2S	1 293,15	4 523,0	16	1P 1S	121,47	3 357,9
3	2P 1S	1 362,61	7 243,1	C1	1P 1S	200,00	4 885,3
4	2P 1S	1 434,43	15 979,3	C2	1P 1S	252,00	1 215,2
5A	1P 1S	686,05	3 448,4	C3	1P 1S	262,00	6 588,5
5B	1P 1S	686,05	3 361,8	C4	1P 1S	209,22	7 000,0
5C	2P 1S	1 372,10	8 595,1	C5	1P 1S	189,42	12 178,5
6	2P 1S	814,63	5 076,0	H1	1	Forno	34 892,0
7	2P 1S	1 499,02	12 148,3	Trocadores novos			
8	2P 1S	1 198,88	12 659,7	17	1P 2S	1 283,74	6 303,7
9	2P 1S	762,79	9 340,8	18	1P 3S	2 076,93	6 028,0
10	2P 1S	1 500,00	10 276,7	19	1P 1S	260,32	1 622,5
11	2P 2S	1 838,95	14 234,9	20	1P 1S	291,65	3 468,0
12	2P 1S	1 500,00	14 422,6	21	1P 1S	249,16	5 018,7
13	2P 1S	335,20	3 811,6	22	1P 1S	405,23	3 528,3
14	2P 2S	2 518,20	25 500,0	23	1P 1S	288,35	5 708,2

Com mínimas modificações nas condições de operação dos trocadores reutilizados e razoável manutenção do “lay-out” original, a rede obtida excede ligeiramente os objetivos de projeto: a área adicional é de 4 855 m² (13 % abaixo do previsto), com um investimento de 5 629 902 dólares e economia de energia de 1 735 001 dólares. O custo anual ficou bem próximo do esperado (US\$ 7 998 000), mas o tempo de retorno caiu para 3,24 anos, em vez dos 3,41 anos originalmente previstos pelo método proposto.

Em todos os cálculos de área de troca requerida, tanto para os trocadores existentes quanto para os novos, foram aplicados os coeficientes de convecção pré-estimados para as correntes, listados na Tabela 5.1 (definição do caso). Estes valores, aliás, podem ser vistos como exatos para os trocadores existentes, desde que reutilizados exatamente nas condições originais, pois a rede existente reproduzia fielmente os requisitos das correntes, sem déficit ou superávit para qualquer uma delas.

Quanto às perdas de carga, existe uma tendência natural de aumento em qualquer projeto de reaproveitamento, causada pela adição de novos trocadores, o que nem sempre pode ser feito em ramais paralelos. Na rede apresentada aqui, também foi observado este aspecto, mas um aumento da perda de carga pode (e deve) ter aparecido, para algumas das correntes, o que é absolutamente normal em qualquer projeto deste tipo.

Os pequenos desvios observados em relação aos objetivos de projeto também são absolutamente normais, uma vez que a previsão de área tem margem de erro da ordem de 10 %. Além disto, no reaproveitamento de redes, os desvios tendem a ser um pouco mais acentuados, pois a eficiência da área (no reaproveitamento ou em sua adição) é difícil de prever com exatidão. Em todo caso, normalmente, os desvios não costumam ser grandes, como neste caso específico.

Como virtude adicional, a solução apresentada para este caso não exhibe qualquer falha de atendimento, com relação aos requisitos das correntes de processo. Isto às vezes acontece neste tipo de projeto, em que eventualmente pequenos desvios são tolerados para simplificar um pouco o processo e não onerá-lo exageradamente. Ademais, sempre usando os coeficientes de convecção associados a cada corrente, a simulação da rede também exhibe grande alinhamento com as condições de processo. Em outras palavras, se a nova rede fosse posta a operar, sem qualquer controle, exibiria mínimos desvios em relação às temperaturas finais esperadas para cada corrente, o que também é algo incomum, neste tipo de projeto.

De fato, numa rede readaptada, é relativamente comum que um ou mais trocadores estejam superdimensionados para o serviço pretendido. Quando isto ocorre, muitas vezes é necessário lançar mão de um controle automático para restringir sua carga térmica, e evitar que ela se transforme num problema, diretamente, ou, indiretamente, venha a provocar um déficit ou superávit de carga térmica em outros trocadores subseqüentes daquelas correntes.

Por sorte, ou melhor, porque foram tomados os devidos cuidados, isto não ocorre na solução proposta, que, resumizando, atende bastante bem aos requisitos de processo de todas as correntes, inclusive sem excedê-los (o que também poderia trazer problemas), com grande similaridade topológica com a rede original. Em termos econômicos, ela suplanta as expectativas do método tradicional, ao mesmo tempo em que confirma as previsões (mais ambiciosas) do método proposto. Assim, com as devidas ressalvas, e por se tratar ainda de um único exemplo, este caso cumpre bastante bem sua função, constituindo-se na primeira, porém considerável, demonstração das vantagens do método proposto.

5.3 - Estudo comparativo - Caso 5.2

O segundo caso a ser analisado é praticamente igual ao primeiro, com uma única modificação: na equação de custo dos trocadores, o parâmetro "b" é reduzido para 12 000 (ao invés dos 18 000 originais), para comparar seu efeito sobre os dois métodos.

Como esperado, a reação do método tradicional é a redução do tempo de retorno, uma vez que o investimento é proporcionalmente reduzido. Portanto, de forma simplista, o investimento e o tempo de retorno seriam divididos por 1,5 (a mesma relação de custo), em relação à previsão anterior (Tabela 5.4), conforme mostrado na Tabela 5.7. Obviamente, o tempo de retorno continua apresentando um mínimo quando o ΔT_{min} é de 14 °C, mas agora se justificaria chegar até 11 °C, se admitirmos um limite de 4 anos para o tempo de retorno.

Tabela 5.7 – Caso 5.2 (casos mais baratos) – Método tradicional (α -constante)

ΔT_{min}	A_{add} (m ²)	N_{add}	Custos (10 ⁶ US\$)		TR (anos)	ΔT_{min}	A_{add} (m ²)	N_{add}	Custos (10 ⁶ US\$)		TR (anos)
			Invest.	Econ.					Invest.	Econ.	
11 °C	12 178	17	8,100	2,106	3,85	18 °C	5 215	7	3,410	1,058	3,22
12 °C	10 339	14	6,785	1,957	3,47	19 °C	4 192	6	2,819	0,908	3,11
13 °C	8 829	12	5,804	1,807	3,21	20 °C	3 299	5	2,275	0,756	3,01
14 °C	7 544	11	5,115	1,657	3,09	21 °C	2 506	4	1,768	0,606	2,92
15 °C	7 567	11	5,124	1,507	3,40	22 °C	1 793	3	1,291	0,457	2,83
16 °C	7 895	11	5,247	1,357	3,87	23 °C	1 144	2	0,840	0,306	2,74
17 °C	6 419	9	4,278	1,207	3,54	24 °C	549	1	0,411	0,156	2,63

A resposta do método proposto, todavia, tem outro perfil. Naturalmente, o tempo de retorno também é positivamente afetado pela redução do custo dos trocadores, mas o ponto ótimo do custo anual, na verdade, é muito mais associado às variações de cada custo (área e utilidades) frente ao ΔT_{min} que propriamente aos seus valores. Com efeito, o ponto ótimo ocorre quando as derivadas destas funções têm módulos iguais e sinais contrários.

As previsões do método proposto são mostradas na Tabela 5.8 e o comportamento do custo anual é graficamente representado na Figura 5.7. Como no método tradicional, o tempo de retorno apresenta um mínimo num ΔT_{min} em torno de 14 °C, que, aliás, é também a região onde ocorre o mínimo do Caso 5.1 (em que os cascos são 50% mais caros). Como no primeiro exemplo, as áreas adicionais requeridas, de acordo com o método proposto, são bem menores que no método tradicional, e por isto, os tempos de retorno são mais baixos. Todavia, desta vez, o ΔT_{min} em que ocorre o custo ótimo não coincide com o que apresenta um mínimo no tempo de retorno (como no Caso 5.1), e o ponto ótimo é mais nítido, o que se pode notar comparando os perfis de evolução do custo (Figura 5.5 e Figura 5.7).

Tabela 5.8 – Caso 5.2 (cascos mais baratos) - Previsões do método proposto

ΔT_{min}	A_{add} (m ²)	N_{add}	Custo total (US\$/ano)	TR (anos)	ΔT_{min}	A_{add} (m ²)	N_{add}	Custo total (US\$/ano)	TR (anos)
11 °C	9 247	13	7 734 584	2,93	18 °C	3 779	6	8 084 041	2,51
12 °C	7 802	11	7 693 632	2,66	19 °C	2 975	4	8 091 702	2,14
13 °C	6 617	9	7 671 863	2,41	20 °C	2 274	4	8 189 119	2,21
14 °C	5 608	8	7 705 064	2,27	21 °C	1 651	3	8 251 051	2,03
15 °C	5 626	8	7 856 238	2,50	22 °C	1 091	2	8 318 126	1,79
16 °C	5 883	8	8 025 150	2,85	23 °C	581	1	8 389 981	1,38
17 °C	4 724	7	8 046 953	2,67	24 °C	114	1	8 489 290	1,09

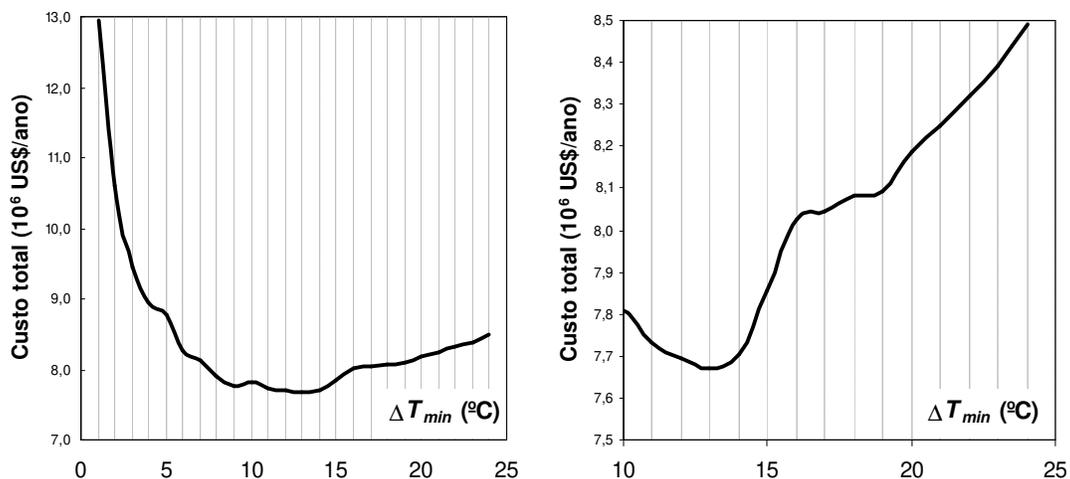


Figura 5.7 – Caso 5.2 – Método proposto – Custo anual x ΔT_{min} em duas escalas

De qualquer maneira, como no primeiro exemplo, os objetivos estabelecidos pelo método proposto são mais ambiciosos que os do método tradicional, e requerem que uma solução seja apresentada para demonstrar novamente seu realismo. E isto poderia ser feito, usando como ponto de partida o novo ΔT_{min} ótimo (e os objetivos estabelecidos para esta condição). Todavia, o ΔT_{min} ótimo, neste segundo caso, é muito semelhante ao do primeiro (em torno de 13 °C e 14 °C, respectivamente), o que permite imaginar que a rede sintetizada para o primeiro caso esteja razoavelmente próxima da rede ótima para o segundo. De fato, se for aplicada a nova equação de custo à rede sintetizada para o caso anterior (Figura 5.6 e Tabela 5.6), ela corresponderia agora a um investimento de US\$ 3 753 268, com um custo anual de US\$ 7 625 000 (muito próximo ao sugerido pelo método proposto, para o ΔT_{min} de 13 °C). Com a mesma economia de energia, de US\$ 1 735 001, o tempo de retorno seria de 2,16 anos, novamente muito próximo do esperado (especialmente se lembrarmos que a rede foi sintetizada para um ΔT_{min} próximo a 14 °C, que era o ótimo para o Caso 5.1).

Como mencionado, redes de custo ligeiramente menores poderiam ser sintetizadas, provavelmente com investimento e economia de energia um pouco maiores, se o ΔT_{min} de 13 °C fosse utilizado desde o início como base de projeto. Todavia, a própria rede citada já serve bastante bem para demonstrar, pela segunda vez, que os objetivos estabelecidos pelo método proposto são realistas, mesmo sendo mais ambiciosos que os do método tradicional.

5.4 - Estudo numérico - Caso 5.3

Finalmente, nosso terceiro exemplo também é derivado do primeiro, mas com um aumento de vazão de 20% em todas as correntes, como numa ampliação da unidade.

Para esta situação, a rede existente, incluindo os resfriadores e aquecedores atuais, é insuficiente para atender à demanda energética de todas as correntes. Portanto, o método tradicional, baseado no tempo de retorno, não pode ser aplicado, já que não existe o caso base para comparação do consumo de energia (e mesmo o investimento equivalente a cada ΔT_{min} é indefinido, pois um investimento inicial seria requerido para atender aos requisitos de todas as correntes, e não existe método para sua previsão). É claro que certas adaptações ou procedimentos iniciais poderiam ser desenvolvidos com o objetivo de manter o método tradicional, mas até hoje não existem técnicas publicadas para isto, e é bem possível que, ainda assim, sua aplicação seja prejudicada, neste tipo de situação.

Não será possível, portanto, observar a vantagem do método proposto neste caso, mas o realismo de sua previsão dos objetivos de projeto será posto à prova mais uma vez.

À exceção das capacidades caloríficas (CP) das correntes, e das correspondentes cargas térmicas, todos os parâmetros originais (Tabela 5.1) foram mantidos, incluindo os coeficientes de convecção (que, nos trocadores existentes, dependeriam, em termos mais estritos, da velocidade, ou da vazão, das correntes). Também foi mantido o valor utilizado para a eficiência de reutilização da área (E_r), de 80%, e, por conseguinte, a área efetiva (A_e) de 17 291,20 m², que representa o aproveitamento “útil” da área total existente.

Com isto, para cada ΔT_{min} , tanto o custo de utilidades quanto a área mínima (A_{min}) requerida pela rede nova correspondente são 20% maiores que no caso original (Tabela 5.3 e Tabela 5.5, respectivamente), e os objetivos do método proposto podem ser calculados. O resumo destes objetivos é mostrado na Tabela 5.9 (omitindo o tempo de retorno, por falta de um caso base), enquanto a Figura 5.8 apresenta a variação do custo anual com o ΔT_{min} .

Tabela 5.9 – Caso 5.3 (ampliação de carga) – Previsões do método proposto

ΔT_{min}	A_{agd} (m ²)	N_{add}	Custo total (US\$/ano)	TR	ΔT_{min}	A_{agd} (m ²)	N_{add}	Custo total (US\$/ano)	TR
11 °C	14 554	20	10 679 277	-	18 °C	7 993	11	10 644 787	-
12 °C	12 821	18	10 541 012	-	19 °C	7 028	10	10 654 748	-
13 °C	11 398	16	10 437 299	-	20 °C	6 187	9	10 678 220	-
14 °C	10 187	14	10 357 128	-	21 °C	5 440	8	10 712 252	-
15 °C	10 209	14	10 539 506	-	22 °C	4 767	7	10 754 773	-
16 °C	10 518	15	10 816 525	-	23 °C	4 156	6	10 804 210	-
17 °C	9 127	13	10 716 359	-	24 °C	3 595	5	10 859 255	-

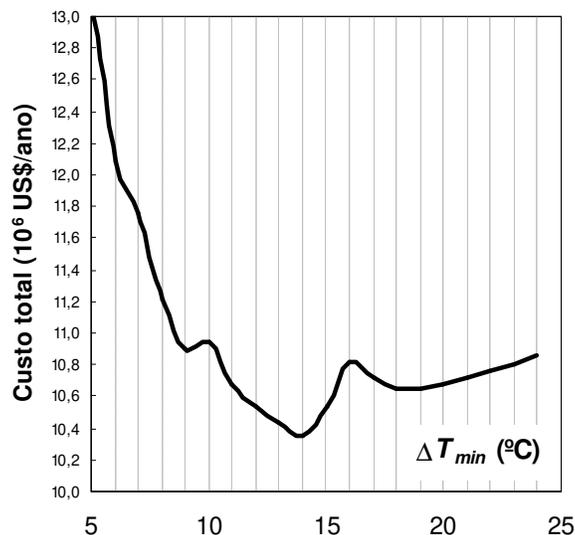


Figura 5.8 – Caso 5.3 – Método proposto – Custo anual x ΔT_{min}

Embora mais uma vez situado num ΔT_{min} em torno dos 14 °C, o custo ótimo é um pouco mais nítido que nos casos anteriores, como se pode verificar comparando as figuras correspondentes.

Embora próximo do ponto ótimo dos casos anteriores, e até do próprio “ótimo” do projeto de uma rede nova, esta não é uma generalização válida. Com efeito, no método ora proposto, o ΔT_{min} ótimo tende, em princípio, a ser deslocado em relação ao das redes novas, em virtude das esperadas mudanças que devem ocorrer na inclinação da função que associa o custo da área ao ΔT_{min} , na região relevante. Entretanto, esta tendência conceitual pode ser mascarada por pequenas variações de inclinação daquela função, fazendo com que o ponto ótimo de diferentes condições de projeto aparentemente, ou realmente, coincida. Em geral, isto é favorecido pela semelhança da área média dos cascos novos, nos diferentes casos, já que o custo da área é calculado justamente em função do custo médio dos cascos, ou seja, do custo de um casco de área média. Neste caso específico, o ΔT_{min} ótimo seria de 13,6 °C, contra 13,5 °C do caso 5.1, embora nossas tabelas resumidas sempre indiquem 14 °C.

Nos dois estudos anteriores, nenhuma referência foi feita a respeito da capacidade do forno, já que, em ambos os casos, era presumida uma redução do consumo de utilidades, garantindo a suficiência do forno disponível. Com as vazões aumentadas em 20%, contudo, isto deixa de ser necessariamente verdadeiro, em qualquer condição, mas, felizmente, neste caso, pode-se verificar que o forno existente sempre terá capacidade suficiente, desde que o ΔT_{min} seja menor que 15,31 °C, o que de fato acontece em toda a região vizinha ao ótimo. A rigor, portanto, tanto a Tabela 5.9 quanto a Figura 5.8 deveriam ser corrigidas, de tal forma que fosse incluído, para qualquer ΔT_{min} maior que 15 °C, o custo de um forno adicional (ou da ampliação do forno existente). Este cuidado, entretanto, apenas reforçaria nossa escolha do ΔT_{min} , que aconteceu de forma natural e independente deste efeito. Portanto, para efeitos práticos, a inclusão do custo do forno adicional, quando o ΔT_{min} é superior a 15 °C, pode ser considerada desnecessária, pois isto em nada modificaria os resultados aqui apresentados.

Assim, com os objetivos estabelecidos pelo método proposto, para um ΔT_{min} ótimo aproximado de 14 °C, e, ainda, com a estratégia de síntese associada a este mesmo método, foi obtida uma rede remontada, que novamente atinge os objetivos de projeto e serve, mais uma vez, para demonstrar seu realismo (mesmo sendo ambiciosos). Esta solução manual, já otimizada em computador, é mostrada na Figura 5.9 e detalhada na Tabela 5.10.

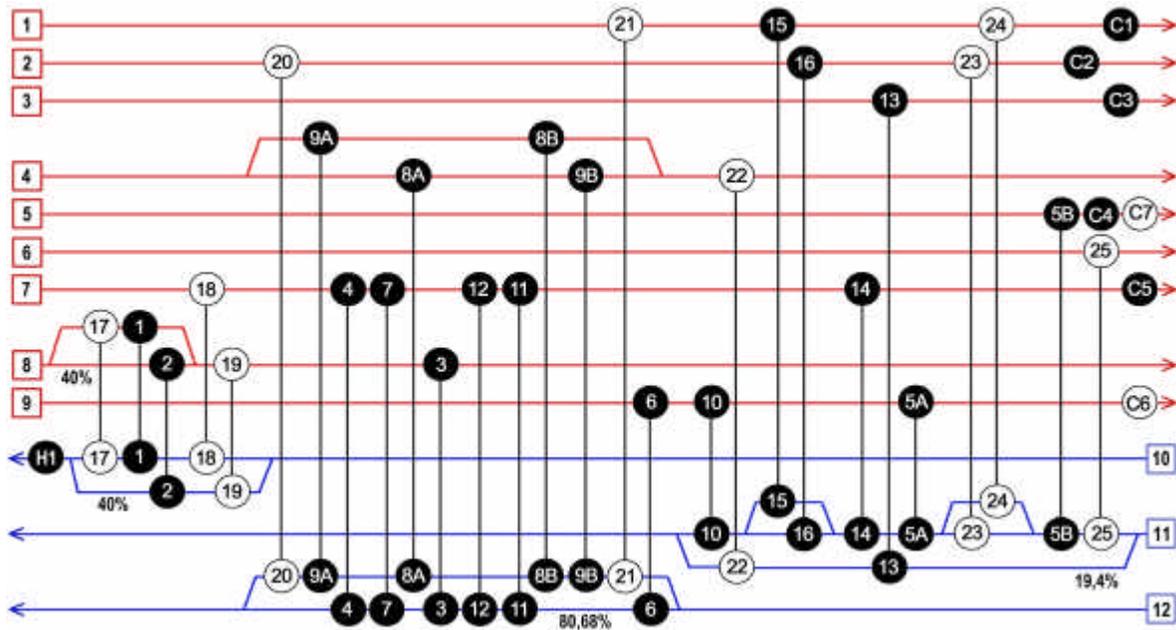


Figura 5.9 – Caso 5.3 (ampliação) – Método proposto - Rede otimizada

Tabela 5.10 – Detalhes da rede mostrada na Figura 5.9

Unid.	Cascos	Área (m ²)	ΔH (kW)	Unid.	Cascos	Área (m ²)	ΔH (kW)
1	1P 2S	1 407,62	5 815,0	C1	1P 1S	200,00	5 014,8
2	1P 2S	1 293,15	5 972,6	C2	1P 1S	252,00	5 367,0
3	2P 1S	1 362,61	14 659,4	C3	1P 1S	262,00	5 021,1
4	2P 1S	1 434,43	14 885,3	C4	1P 1S	209,22	7 851,5
5A	2P 1S	1 372,10	8 529,0	C5	1P 1S	189,42	9 481,9
5B	2P 1S	1 372,10	22 175,7	H1	1	Forno	41 963,0
6	2P 1S	814,63	7 539,7	Trocadores novos			
7	2P 1S	1 499,02	11 206,3	17	1P 1S	458,30	3 108,7
8A	1P 1S	599,44	3 654,9	18	2P 2S	2 447,60	11 485,7
8B	1P 1S	599,44	3 808,5	19	2P 2S	2 897,91	7 645,1
9A	1P 1S	381,39	1 955,6	20	1P 2S	438,19	4 036,2
9B	1P 1S	381,39	3 417,4	21	1P 1S	103,42	2 886,8
10	2P 1S	1 500,00	5 784,3	22	1P 2S	1 013,22	13 563,6
11	2P 2S	1 838,95	13 790,3	23	1P 1S	311,34	6 256,6
12	2P 1S	1 500,00	15 360,0	24	1P 1S	419,07	6 541,8
13	2P 1S	335,20	7 458,9	25	1P 1S	501,74	8 400,0
14	2P 2S	2 518,20	24 230,8	C6	1P 1S	329,08	5 027,3
15	1P 1S	170,25	2 776,6	C7	1P 1S	18,10	572,8
16	1P 1S	121,47	2 700,2				

Como no primeiro caso, sempre usando os coeficientes de convecção previamente estimados, a rede remontada satisfaz plenamente a todas as correntes e apresenta apenas um desvio na simulação livre do conjunto: o resfriador C5, reutilizado, está superdimensionado para o serviço e pode requerer controle para evitar resfriamento excessivo. Por outro lado, o resfriador C7 é dispensável e foi incluído apenas para mostrar que o resfriador C4 (também reutilizado) estaria ligeiramente subdimensionado (numa ótica exageradamente rígida).

Na prática, o próprio resfriador C4 poderia completar o resfriamento pretendido, com um ligeiro aumento da vazão de água de resfriamento, por exemplo. Além disto, e se isto não for possível, o próprio produto que é resfriado ali facilita outro tipo de providência: a corrente 5 é um refluxo circulante e tem características que a tornam muito mais flexível que uma corrente de processo normal. De fato, um refluxo circulante, como o nome sugere, retorna à coluna de destilação, num ponto acima de sua retirada, com a missão de retirar da torre uma quantidade determinada de energia, aumentando a quantidade de refluxo líquido interno (necessário à uma boa separação na coluna). Acontece que esta quantidade de calor a ser removido pelo refluxo circulante, embora fixada por critérios de otimização, tem uma certa flexibilidade, pois ela, na verdade, faz parte de um conjunto, comandado pelo refluxo de topo e eventualmente completado por outros refluxos circulantes. Portanto, um pequeno desvio na carga térmica de um refluxo circulante é normalmente compensado pelo resto do sistema, com baixíssimo impacto sobre o processo. Além disto, por sua própria natureza, os refluxos circulantes podem ter vazão e temperatura de retorno variável, para ajuste da carga térmica por ele removida da torre. Esta flexibilidade, que é corriqueiramente explorada pelo controle automático destas unidades, serviria, naturalmente, para completar a carga térmica do resfriador C4, através de um pequeno aumento de vazão do refluxo (se isto for tolerado pelo bombeamento atual). Portanto, por um caminho ou pelo outro, o pequeno déficit nesta corrente pode facilmente ser contornado (ou absorvido) pelo próprio processo, sem a menor necessidade de um resfriador adicional.

Para maior similaridade com a topologia e as condições operacionais do conjunto original, bem como para minimizar a natural tendência de uma demanda por bombeamento adicional, comum em casos de “retrofit”, foram criados ramais adicionais para as correntes da carga, de tal forma a acomodar aproximadamente o aumento de carga.

A rede obtida não foi objeto de projeto detalhado, o que significa dizer que a área dos trocadores novos e o desempenho dos antigos tiveram por base os mesmos coeficientes de convecção previamente estimados. Nestas condições, comumente aplicada nesta fase do projeto, mesmo em redes novas, novamente se pode observar um grande alinhamento entre as previsões do método proposto e o custo anual da rede obtida (US\$ 10 328 000).

Em resumo, a rede obtida é adequada ao processo, exige mínimas modificações e satisfaz a todas as correntes, inclusive na simulação. Assim, e por ser bastante complexo, este exemplo demonstra, mais uma vez, o realismo e a versatilidade do método proposto.

5.5 - Comparação e características adicionais

Nas duas comparações numéricas feitas neste capítulo, o método tradicional para o reaproveitamento de redes existentes foi representado por um caminho de “retrofit” que se poderia considerar mais modesto (e mais seguro), o chamado α -constante. Naturalmente, a escolha deste caminho seguiu as recomendações tradicionalmente associadas a este método, mas, de qualquer forma, se poderia argumentar que o método proposto não teria produzido objetivos tão mais ambiciosos se o método tradicional tivesse sido aplicado com o caminho mais agressivo, ou seja, o do α -incremental, em que se admite uma eficiência de 100% para toda a área adicional (aproximando-se das premissas do método proposto, em que somente a reutilização da área existente é afetada por uma certa ineficiência).

O argumento não deixa de ter alguma razão, mas, por outro lado, o caminho mais agressivo só é recomendado pelos autores e usuários do método tradicional, para os casos em que a eficiência original da área é relativamente baixa, sendo que esta fronteira estaria mais ou menos caracterizada por uma eficiência original em torno de 80%. Na verdade, as redes com eficiência em torno de 80% seriam consideradas “eficientes”, enquanto somente valores da ordem de 60% (ou menores) é que caracterizariam, com toda a segurança, uma rede ineficiente.

Nos nossos exemplos, a eficiência original da área era de 78,53%, e a eficiência de reutilização escolhida na aplicação do método proposto, de 80%. Portanto, se o caminho do α -incremental tivesse sido aplicado (mesmo não sendo recomendado), o método tradicional teria apontado objetivos de projeto muito semelhantes aos do método proposto, visto que a eficiência de reutilização da área existente seria praticamente a mesma, nos dois métodos, bem como a da área adicional (100%). Esta semelhança pode ser conferida, comparando a Tabela 5.11 (α -incremental) com as colunas equivalentes da Tabela 5.5 (método proposto).

Tabela 5.11 – Caso 5.1 – Método tradicional – Previsão financeira (α -incremental)

ΔT_{\min}	A_{add} (m ²)	N_{add}	Custos (10 ⁶ US\$)		TR (anos)	ΔT_{\min}	A_{add} (m ²)	N_{add}	Custos (10 ⁶ US\$)		TR (anos)
			Invest.	Econ.					Invest.	Econ.	
11 °C	9 564	13	9,431	2,106	4,48	18 °C	4 096	6	4,174	1,058	3,95
12 °C	8 119	11	7,995	1,957	4,09	19 °C	3 292	5	3,409	0,908	3,75
13 °C	6 934	10	7,018	1,807	3,88	20 °C	2 591	4	2,702	0,756	3,57
14 °C	5 925	8	5,825	1,657	3,52	21 °C	1 968	3	2,041	0,606	3,37
15 °C	5 943	8	5,835	1,507	3,87	22 °C	1 408	2	1,416	0,457	3,10
16 °C	6 200	9	6,293	1,357	4,64	23 °C	898	2	1,101	0,306	3,59
17 °C	5 041	7	5,018	1,207	4,16	24 °C	431	1	0,538	0,156	3,44

Assim, em termos genéricos, o método tradicional, através do α -incremental, pode até gerar objetivos de projeto mais ambiciosos que os do método proposto. Bastaria, para tal, que a eficiência da área original fosse superior ao valor escolhido, no método proposto, para a eficiência de reutilização (normalmente situado na faixa de 80 a 90%). Na prática, todavia, esta condição seria absolutamente improvável. Em primeiro lugar, com este nível de eficiência original, o caminho caracterizado pelo α -incremental não seria recomendado. Além disto, esta própria condição pressupõe muito pouca oportunidade para otimização, e projetos mais difíceis, independente do método utilizado. De fato, é mais fácil otimizar uma rede ineficiente que uma bateria com uma área de troca que seja 95% ou 100% compatível com sua recuperação de calor (alta eficiência de área).

Portanto, as situações em que o método tradicional poderia gerar objetivos (pouco) mais ambiciosos que os do método proposto são justamente as menos promissoras: pequena chance de otimização (com tempo de retorno aceitável) e projetos mais difíceis. Além disto, o α -incremental não difere do α -constante no que diz respeito à inaplicabilidade do método tradicional, nos casos em que o tempo de retorno não pode ser calculado (pela inexistência de um caso base para comparação).

Com isto, pode-se realmente considerar, em princípio, e de forma genérica, que os objetivos de projeto do método proposto tendem a ser mais ambiciosos que os do método tradicional, além de serem aplicáveis a qualquer tipo de caso envolvendo redes existentes.

Por outro lado, existe uma notável tendência do método proposto que poderia ser vista como um vício ou defeito: o custo ótimo anual esperado para a rede remontada muitas vezes se situa no mesmo nível de recuperação de energia (ou de consumo de utilidades) de uma rede nova, projetada para atender o mesmo caso. Em outras palavras, o ΔT_{min} ótimo da rede nova (para o caso correspondente) costuma coincidir, aproximadamente, com o ΔT_{min} ótimo calculado pelo método proposto (com o reaproveitamento da rede existente).

A idéia do vício viria da conclusão de que esta coincidência parece indicar que é o consumo de utilidades associado à rede nova que define até onde se deve seguir o caminho de “retrofit” do método proposto, da mesma forma que o tempo de retorno define o alcance da otimização, no método tradicional. Em outras palavras, cria-se a ilusão de que o método proposto fará coincidir o ΔT_{min} ótimo e o consumo de utilidades, em relação às redes novas, e isto não é verdade, embora possa acontecer (e, aproximadamente, aconteça muitas vezes).

Acontece que esta característica, que muitas vezes resulta na coincidência do ΔT_{min} ótimo, na síntese de uma rede nova ou na remontagem de uma rede existente, é plenamente consistente com a base conceitual do método proposto e facilmente justificável. Com efeito, o custo total é a soma dos custos anuais relativos ao investimento em área e ao consumo de utilidades, ambos associáveis ao ΔT_{min} através de formulações que permitem sua estimativa e podem ser traduzidas por funções hipotéticas, de inclinação variável (Figura 5.1). O custo ótimo corresponde a um mínimo da função de custo anual combinado, em que sua derivada em relação ao ΔT_{min} é nula, ou seja, onde as derivadas das funções individuais de custo têm módulos iguais e sinais contrários. Noutras palavras, o custo ótimo é muito mais associado às inclinações de cada função de custo (área e utilidades) frente ao ΔT_{min} que propriamente aos seus valores.

Observando o que caracteriza as inclinações individuais, pode-se, então, entender a razão da coincidência em questão. Em primeiro lugar, a inclinação da função relativa ao consumo de utilidades independe do fato de se projetar uma rede nova ou reaproveitar uma rede existente. O custo anual da área, por sua vez, deve ser bem diferente, conforme o tipo de projeto, mas isto não necessariamente se repete em relação à inclinação da função que o representa. De fato, o custo da área é calculado multiplicando o número de cascos (novos) pelo custo de um casco de área média (no caso de redes existentes, ainda se soma a isto um custo fixo de reaproveitamento, sem efeito sobre a inclinação). Desta forma, a inclinação da função que representa o custo de área depende muito mais da área média dos cascos novos que da própria área total. Basta, portanto, que esta média seja semelhante para que o ΔT_{min} ótimo também coincida, pelo menos aproximadamente. E acontece que isto é relativamente comum, e deve ser visto muito mais como virtude do que como defeito do método proposto (já que redes remontadas, desta forma, tendem a recuperar quase tanta energia quanto redes novas, mesmo exigindo, naturalmente, uma área final um pouco maior, devido à eficiência de reutilização da área ser sempre inferior a 100%).

Tudo isto se refere à aplicação do método proposto com a finalidade específica de projetar redes remontadas voltadas para o custo ótimo. Não se deve esquecer que o método proposto também pode ser utilizado de forma similar ao método tradicional, com o objetivo de se alcançar um tempo de retorno pré-estabelecido para o projeto de otimização, ou até para buscar-se um tempo de retorno “ótimo”. Sobretudo, é preciso salientar que, também nestes casos, permanece sua vantagem de estabelecer objetivos mais ambiciosos.

5.6 - Aplicação a casos complexos (cuidados adicionais)

A aplicação do método proposto não é restrita a casos simples ou acadêmicos, e os exemplos desta tese foram escolhidos justamente para demonstrar isto, inclusive na síntese da rede remontada, que serve para demonstrar o realismo dos objetivos de projeto. De fato, mesmo que isto não esteja totalmente evidente, a síntese das redes apresentadas exigiu, em média, cerca de uma semana de trabalho, com tratamento condizente com problemas reais, e não com casos acadêmicos ou hipotéticos, em que a liberdade de síntese é muito maior, por conta da inexistência de restrições ou estratégias de projeto relacionadas ao processo.

Além disto, uma versão embrionária deste método já foi aplicada a vários projetos reais, dentro da Petrobras, com grande sucesso em todos os sentidos, incluindo um elevado nível de confiança nos resultados, ao fim do projeto, bem como uma grande satisfação dos clientes com relação à interface entre a rede e o processo industrial (na verdade, os clientes tiveram participação ativa e puderam interferir nestes projetos, de forma que suas demandas foram sendo atendidas durante o próprio processo de síntese).

Invariavelmente, as redes projetadas na Petrobras através deste método apresentam grande eficiência energética (alto nível de recuperação de calor), se comparadas com outras unidades e com a rede original, e investimento absolutamente compatível (em geral, o custo ótimo foi utilizado como critério de projeto, mas tanto o tempo de retorno quanto um limite de investimento foram monitorados, em alguns casos). Estas observações se referem não só aos resultados do projeto, mas aos resultados operacionais, depois de sua implantação.

Num único projeto, na verdade o primeiro deles, o método tradicional foi aplicado inicialmente, de tal maneira que os resultados dos dois métodos puderam ser comparados, pela primeira e única vez, numa situação absolutamente real de projeto. Tratava-se, todavia, de uma ampliação, em que a aplicação do método tradicional é praticamente inviável, tendo sido usado apenas por falta de alternativa. Nesta situação, um embrião do método proposto foi usado pela primeira vez, resultando numa redução de investimento em torno de 25% (ou um milhão de dólares, na época) e numa economia, no forno atmosférico, de cerca de 20% (que correspondia a 300 mil dólares anuais, e hoje equivaleria a cerca de três vezes mais).

Nos projetos feitos na Petrobras, e nos exemplos desta tese, foi possível observar que as regras e ferramentas de síntese, importadas do método original (para redes novas), facilitaram bastante a remontagem da rede, ainda que isto nunca seja realmente fácil.

De fato, projetos de reaproveitamento ou otimização de redes existentes são mais complicados que a síntese de redes novas. Além disto, projetos reais envolvem dificuldades adicionais, eventualmente bastante complexas. Todavia, a solução da maior parte delas foge aos objetivos desta tese e tampouco sua discussão acrescentaria muita coisa à demonstração das vantagens do método proposto. Alguns aspectos, entretanto, oferecem oportunidades de ganho ou a necessidade de um tratamento especial e merecem ser abordados.

Um exemplo bem simples está relacionado à presença de trocadores existentes em mal estado de conservação, e cuja reutilização estaria sujeita a custos significativos. Nestes casos, bastaria incluir estes serviços no custo de reutilização individual daqueles trocadores, e isto naturalmente se refletiria no custo total de reutilização.

Algo parecido poderia ser feito se determinados trocadores exigissem uma troca de peças, por questões de resistência mecânica ou química, ou nem pudessem ser reutilizados, conforme seu novo serviço. Neste caso, todavia, aumentar os custos de reutilização de cada trocador afetado não parece ser a forma adequada de representar a situação, pois tais custos podem ou não realmente ocorrer, dependendo das condições de reutilização. Por outro lado, estabelecer-se uma eficiência de reutilização menor também pode não ser o caminho certo (embora, talvez melhor que o acréscimo no custo individual de reutilização).

Com efeito, para os casos em que o tipo de serviço influencia a reutilização, uma simples providência pode ajudar bastante: separar a área existente em três grupos distintos (representando os trocadores de processo, resfriadores e aquecedores) e estabelecer regras de reutilização conforme o tipo de serviço original. Por exemplo, pode-se estabelecer que os resfriadores não possam ser reutilizados como trocadores de processo ou aquecedores, mas todas as demais combinações sejam aceitáveis. Nos nossos casos, seria razoável, por exemplo, que os aquecedores (no caso, um único forno) pudessem ser reutilizados apenas neste mesmo tipo de serviço (e isto foi feito, de forma intrínseca, não computando a área do forno como área existente e desprezando-a, também, ao calcular a área mínima para a rede remontada, até aquele limite).

A separação da área existente em grupos distintos, com as conseqüentes regras de reutilização, pode ser tratada na etapa de estabelecimento de objetivos, no método proposto, bem como durante o processo de síntese, representando um refinamento bastante útil, para muitos problemas, embora desnecessário para outros, como em nossos exemplos.

Capítulo 6

Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

Como esperamos haver demonstrado, o método proposto pode ser aplicado a todos os tipos de projeto envolvendo redes existentes, desde a simples otimização até a ampliação ou “desengargalamento” da unidade industrial em que elas se inserem. Além disto, os mais diversos critérios podem ser utilizados ao definir os objetivos de projeto, incluindo o tempo de retorno (quando cabível), que constitui a única base do método tradicional.

O método proposto inclui a estratégia de síntese, mas não as regras e ferramentas específicas para a remontagem da rede. Ao contrário, uma de suas vantagens é justamente a de espelhar-se no método de síntese de redes novas, aproveitando todas as suas ferramentas e procurando reproduzir todas as suas virtudes. Assim, fundamentalmente, trata-se de um método de “targeting”, ou seja, de pré-estabelecimentos de objetivos de projeto.

Para os casos em que o método tradicional pode ser aplicado, o método proposto normalmente estabelece objetivos mais ambiciosos, e, ainda assim, bastante realistas. Em outras palavras, os objetivos de projeto estabelecidos pelo método proposto normalmente podem ser alcançados, na remontagem da rede, mesmo sendo ambiciosos.

O realismo dos objetivos de projeto do método proposto se estende aos casos em que o método tradicional não pode ser aplicado. A propósito, quando se fala em realismo dos objetivos, não basta que eles possam ser alcançados. Objetivos realistas, na verdade, são aqueles que, além disto, dificilmente são superados, pelo menos significativamente, ao dar-se por encerrado o projeto da rede. E isto se verifica, invariavelmente, com o método proposto, tanto em nossos exemplos, quanto nos casos reais em que o método foi aplicado.

Uma última vantagem significativa do método proposto é a estratégia de síntese a ele associada, que congrega e disponibiliza todas as ferramentas de síntese já desenvolvidas para redes novas (assim com outras, que ainda virão). Desta forma, as soluções tendem não apenas a atingir mais facilmente os objetivos de projeto, mas, ainda, a contemplar, desde o início do processo, a adequação da rede ao processo industrial.

Não obstante, pode-se vislumbrar algumas melhorias potenciais a serem estudadas em trabalhos futuros. Por exemplo, a separação da área existente em grupos distintos, citada nos últimos parágrafos do capítulo anterior, pode servir de idéia para um estudo que viesse a demonstrar sua utilidade e detalhar sua aplicação.

Além disto, acreditamos que a síntese automatizada possa ser associada à síntese manual, conforme sugerido no último item do Capítulo 4 (ao final do processo manual de síntese da rede, para acelerar e simplificar seu fechamento). Sem sugestões mais específicas para transformar esta idéia em estudos acadêmicos, é bem possível, de qualquer forma, que esta associação possa ser utilizada para este propósito.

Finalmente, no método proposto, os efeitos do valor adotado para a eficiência de reutilização sobre os resultados podem ser investigados, com o objetivo de facilitar e refinar sua utilização. Neste aspecto, todavia, devemos acrescentar que nossa experiência não o classifica como um fator crítico para a utilização do método, e muito menos impeditivo. Em outras palavras, embora naturalmente influente, este fator pode ser pré-estabelecido pelo projetista (mesmo inexperiente) sem maiores dificuldades ou conseqüências desagradáveis. Em último caso, uma eventual facilidade ou dificuldade de atingir os objetivos indicaria a correção a ser feita sobre um valor originalmente mal estimado, e na pior das hipóteses, a remontagem da rede precisaria ser refeita, a partir de novos objetivos revisados.

Referências bibliográficas

Ahmad, 1985 - Ahmad, S. - Heat Exchanger Network: Cost Tradeoffs in Energy and Capital. *Tese de Doutorado*, Universidade de Manchester, Inglaterra (1985).

Ahmad et al., 1988 - Ahmad, S., Linnhoff, B. & Smith, R. - Design of multipass heat exchangers: an alternative approach. *Journal of Heat Transfer (ASME)* **110**(5) (May 1988), p. 304–309.

Ahmad et al., 1990 - Ahmad, S., Linnhoff, B. & Smith, R. - Cost Optimum Heat Exchanger Networks - Part 2: Targets and Design for Detailed Capital Cost Models. *Computers and Chemical Engineering* **14**(7) (July 1990), p. 751–767.

Asante, 1996 - Asante, N. D. K. - Automated and Interactive Retrofit of Heat Exchanger Networks. *Tese de Doutorado*, Universidade de Manchester, Inglaterra (1996).

Furman & Sahinidis, 2002 - Furman, K. C. & Sahinidis, N. V. - A Critical Review and Annotated Bibliography for Heat Exchanger Network Synthesis in the 20th Century. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. **41**(10) (May 15, 2002), p. 2335-2370.

Hall, 1989 - Hall, S. G. - Targeting for Multiple Utilities in Pinch Technology. *Tese de Doutorado*. Universidade de Manchester, Inglaterra (1989).

Hall et al., 1990 - Hall, S.G., Ahmad, S. & Smith, R. - Capital cost targets for heat exchanger networks comprising mixed materials of construction, pressure ratings, and exchanger types. *Computers and Chemical Engineering* **14**(3) (March 1990), p. 319–335.

Kemp, 2007 - Kemp, I. C. - Pinch Analysis and Process Integration. Elsevier (2007). Item 4.7: Retrofit design, p. 132-146.

Linnhoff, 1978 - Linnhoff, B. - Thermodynamic Analysis in the Design of Process Networks. *Tese de Doutorado*, Universidade de Leeds, Inglaterra (1978).

Linnhoff & Ahmad, 1990 - Linnhoff, B. & Ahmad, S. - Cost Optimum Heat Exchanger Networks – Part 1: Minimum Energy and Capital using Simple Models for Capital Cost. *Computers and Chemical Engineering* **14**(7) (July 1990), p. 729–750.

Liporace, 2000 - Liporace, F. S - Síntese de Redes de Trocadores de Calor: Proposta de um Procedimento Automático e Estudo da Influência da Presença de Misturas que Mudam de Fase. *Tese de Doutorado*, Universidade Federal do Rio de Janeiro - Brasil (2000).

Mizutani, 2003 - Mizutani, F. T. - Síntese de Redes de Trocadores de Calor com o Projeto Detalhado das Unidades via Programação Matemática. *Tese de Doutorado*, Universidade Federal do Rio de Janeiro - Brasil (2003).

Ponton & Donaldson, 1974 - Ponton, J. W. & Donaldson, R. A. B. – A fast method for the synthesis of optimal heat exchanger networks. *Chemical Engineering Science* **29** (1974), p. 2375-2377.

Rodriguez, 2005 - Rodriguez, C. A. - Fouling Mitigation Strategies for Heat Exchanger Networks. *Tese de Doutorado*, Universidade de Manchester, Inglaterra (2005).

Smith, 2005 - Smith, R. - Chemical Process Design and Integration. John Wiley (2005).

Tjoe, 1986 - Tjoe, T. N. - Retrofit of Heat Exchanger Networks. *Tese de Doutorado*, Universidade de Manchester, Inglaterra (1986).

Tjoe & Linnhoff, 1986 - Tjoe, T. N. & Linnhoff, B. - Using Pinch Technology for Process Retrofit. *Chemical Engineering* **93** (April 28, 1986), p. 47-60.